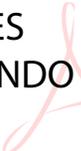


CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. José Andrés Araya Obando, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, Ing. Mauricio Araya Rodríguez, Ing. Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

JOSE ANDRES
ARAYA OBANDO
(FIRMA)



Digitally signed by JOSE
ANDRES ARAYA OBANDO
(FIRMA)
Date: 2020.10.28 11:25:50
-06'00'

Ing. José Andrés Araya Obando.
En representación Director

ROMMEL LEZING
CUEVAS
KAUFFMANN
(FIRMA)



Firmado digitalmente por
ROMMEL LEZING CUEVAS
KAUFFMANN (FIRMA)
Fecha: 2020.10.28 14:56:21
-06'00'

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Guía

MAURICIO
ESTEBAN ARAYA
RODRIGUEZ
(FIRMA)



Firmado digitalmente
por MAURICIO
ESTEBAN ARAYA
RODRIGUEZ (FIRMA)
Fecha: 2020.10.27
15:27:06 -06'00'

Ing. Mauricio Araya Rodríguez.
Profesor Lector

SONIA VARGAS
CALDERON
(FIRMA)



Firmado digitalmente
por SONIA VARGAS
CALDERON (FIRMA)
Fecha: 2020.10.26
12:26:14 -06'00'

Ing. Sonia Vargas Calderón.
Profesora Observadora

Desempeño de concreto permeable con sustitución parcial del material cementante por material vítreo y variaciones de tipo de cemento hidráulico

Abstract

On this work the mechanical and pervious performance of four different pervious concretes was studied, using four different hydraulic cements and a 10% substitution of them by grinded glass. Portland cement type CP II F, CP II Z, CP IV and CP V respectively were used in the previous concretes. The glass used is a transparent soda-lime type on 75 μm particle size.

This project was carried out at the Blumenau Regional University (FURB), Brazil, in a research alliance with the Technological Institute of Costa Rica (TEC).

The method for the design of pervious concrete mix of Nguyen, D. H. (2014) was used. Once the concretes were made, a study of the mechanical compression behavior of cylinders, flexing prisms and the pervious behavior of plates began.

The results show that the concrete with the best mechanical behavior is the one that used CP V and a 10% grinded glass substitution, besides, the four concretes have statistically the same pervious coefficient.

Key words: vitreous waste, grinded glass, pervious concrete, Portland cement substitution, pervious performance, mechanical performance of pervious concrete.

Resumen

En el presente trabajo se estudió el desempeño mecánico y permeable de cuatro diferentes concretos permeables, se utiliza cuatro tipos de cemento hidráulico diferentes y una sustitución de un 10% de estos por vidrio molido. En los concretos permeables realizados se usó cemento Portland de tipo CP II F, CP II Z, CP IV y CP V respectivamente. El vidrio empleado es transparente de tipo soda-cal y posee un tamaño de partícula de 75 μm .

Este proyecto se efectuó en la Universidad Regional de Blumenau (FURB), Brasil, en alianza de investigación con el Tecnológico de Costa Rica (TEC).

Se utilizó la metodología de dosificación de Nguyen, D. H. (2014). Una vez elaborados los concretos, se procedió a estudiar el comportamiento mecánico a compresión de cilindros, a flexión de prismas y el comportamiento permeable de placas.

Los resultados muestran: el concreto con mejor comportamiento mecánico es el que utilizó CP V y 10 % de sustitución de vidrio molido, además, los cuatro concretos poseen un coeficiente de permeabilidad estadísticamente igual.

Palabras clave: Residuos vítreos, vidrio molido, concreto permeable, sustitución de cemento Portland, permeabilidad, desempeño mecánico del concreto permeable.

Desempeño de concreto permeable con sustitución parcial del material cementante por material vítreo y variaciones de tipo de cemento hidráulico

ANDRÉS ROJAS RAMOS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio del 2020

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO	3
INTRODUCCIÓN	6
MARCO TEÓRICO	7
CONCRETO HIDRÁULICO	7
<i>Concreto Permeable</i>	9
<i>Concreto sostenible</i>	11
<i>Tecnologías modernas en el concreto</i> <i>hidráulico</i>	11
VIDRIO RECICLABLE.....	13
<i>Incorporación del vidrio molido en el</i> <i>concreto</i>	14
METODOLOGÍA DE NGUYEN.....	15
PRUEBAS EN EL CONCRETO.....	17
<i>Prueba masa específica e índice de vacíos</i>	17
<i>Ensayo de resistencia a la compresión</i>	17
<i>Ensayo de resistencia a la flexión</i>	18
<i>Ensayo de permeabilidad</i>	18
PRUEBAS ESTADÍSTICAS	19
<i>Prueba Shapiro-Wilk</i>	19
<i>Prueba ANOVA</i>	19
<i>Coefficiente de correlación Pearson</i>	20
METODOLOGÍA	21
CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	21
<i>Vidrio molido</i>	21
<i>Granulometría</i>	22
<i>Masa Específica</i>	23
<i>Absorción</i>	24
DISEÑO DE MEZCLA CON MÉTODO DE NGUYEN ..	24
ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA	26
ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE LOS ESPECÍMENES	29
ENSAYOS MECÁNICOS DE LOS ESPECÍMENES.....	31
<i>Ensayo de compresión axial</i>	31
<i>Ensayo de flexión</i>	31
PRUEBAS ESTADÍSTICAS	32
<i>Prueba de Shapiro Wilk</i>	32
<i>Prueba de ANOVA</i>	33
<i>Coefficiente de correlación de Pearson</i>	33
RESULTADOS	35
CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	35
DISEÑO DE MEZCLA CON MÉTODO DE NGUYEN ..	36
PRUEBA DE ASENTAMIENTO, ÍNDICE DE VACÍOS Y	39
MASA ESPECÍFICA	39
ENSAYOS MECÁNICOS.....	40
ENSAYO DE PERMEABILIDAD.....	49
PRUEBAS ESTADÍSTICAS	51
<i>Coefficiente de correlación de Pearson</i>	51
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	55
CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	55
DISEÑO DE MEZCLA CON MÉTODO DE NGUYEN ..	55
PRUEBA DE ASENTAMIENTO, ÍNDICE DE VACÍOS Y	57
MASA ESPECÍFICA	57
ENSAYOS MECÁNICOS.....	57
ENSAYO DE PERMEABILIDAD.....	60
ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	61
COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON OTROS	62
CONCRETOS.....	62
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	66
APÉNDICES	67
REFERENCIAS	85
ANEXOS	90

Prefacio

La importancia de este proyecto se basa en la necesidad de buscar propuestas y soluciones amigables con el ambiente para materiales utilizados en el ámbito de la construcción, en procura de alcanzar un producto que sea utilizable en calles o aceras.

Con base en la amplia experiencia de los investigadores de la FURB en estudios de concretos permeables, se utiliza materiales reciclables como componentes del concreto y la metodología de diseño de mezcla de Nguyen para concretos permeables.

Este proyecto procura determinar la resistencia a la flexión, resistencia a la compresión y permeabilidad en diferentes concretos permeables; en cada uno de ellos se utiliza un cemento hidráulico diferente con una sustitución de un 10% por vidrio molido.

Agradecimientos

Tanto este trabajo como el esfuerzo que conllevó su elaboración están dedicados a cada una de las personas que me han apoyado y acompañado a lo largo de mi carrera universitaria.

En primer lugar, gracias a mis padres Oscar y Marcela por el apoyo incondicional y cada esfuerzo hecho por sus hijos a lo largo de estos años. Gracias por enseñarme lo que es la dedicación para alcanzar mis metas sin importar los obstáculos.

Al resto de mi familia, por ser un gran apoyo en los momentos más difíciles.

A Paula, por su incondicionalidad en todo momento, por ser uno de mis pilares más grandes en los últimos años.

A mis amigos más cercanos, por ser gran parte de la experiencia universitaria y compartir los momentos más preciados de mi vida.

A los profesores Rommel Cuevas y Abrahán Bernardo, por la ayuda académica que me brindaron en este proyecto y por apadrinarme en el proceso de intercambio.

A la Universidad Regional de Blumenau, por abrirme las puertas para desarrollar la investigación y trabajar al lado de profesionales como João Marcos y Gilson.

A Tanara por recibirme tan cordialmente y hacerme sentir siempre como en casa.

Por último, al Tecnológico de Costa Rica por darme una formación universitaria de primera clase.

Agradecimentos

Este trabalho e o esforço envolvido em sua preparação são dedicados a cada uma das pessoas que me apoiaram e me acompanharam através do meu curso universitário.

Antes de tudo, obrigado aos meus pais Oscar e Marcela pelo apoio incondicional e por todos os esforços feitos por seus filhos em todos esses anos. Obrigado por me ensinar o que é dedicação para alcançar meus objetivos, independentemente dos obstáculos.

Para o resto da minha família, obrigado por ser um grande apoio nos momentos mais difíceis.

A Paula, por sua incondicionalidade em todos os momentos, por ser um dos meus maiores pilares nos últimos anos.

Aos meus amigos mais próximos, por serem a maior parte da experiência da faculdade e por compartilhar os momentos mais preciosos da minha vida.

Aos professores Rommel Cuevas e Abrahão Bernardo, pela ajuda acadêmica que me deram neste projeto e pela ajuda no processo de intercâmbio.

À Universidade Regional de Blumenau, por abrir as suas portas para eu realizar a pesquisa e trabalhar com profissionais como João Marcos e Gilson.

A Tanara por me receber tão calorosamente e por me fazer sentir sempre em casa.

Finalmente, ao Tecnológico de Costa Rica por me dar um ensino universitário de tão boa qualidade.

Resumen ejecutivo

El ámbito de la construcción ha contribuido considerablemente con la evolución del ser humano en su vida cotidiana, sin embargo, generalmente, provoca un impacto ambiental negativo. Por lo tanto, a través de los años los ingenieros y científicos se han encargado de buscar soluciones y alternativas sostenibles dentro de dicho ámbito.

La Global Cement and Concrete Association (2020) indica que el concreto hidráulico es, actualmente, el material hecho por el humano más usado en el mundo. Es después del agua, el recurso más consumido. Dentro de este material se conoce que, debido al proceso de obtención del material, el cemento hidráulico es el material que implica mayor contaminación dentro de los componentes del concreto hidráulico

Según lo mencionado, es preciso obtener más estudios con respecto al avance de los concretos sostenibles. Para obtener esto se realiza estudios en donde se hace uso de materiales reciclados como componentes del concreto, tal como menciona Villegas Flores, N. y Parapinski Dos Santos, A. C. (2013), el uso actual de los materiales que se relacionan con el impacto ambiental y los procesos constructivos poco eficientes siguen siendo el mayor obstáculo para conseguir alcanzar la categoría de “construcción sostenible”.

A pesar de que las propuestas para sustituir el cemento ocasionan que se disminuya su producción y así se afectarían las empresas productoras, también se abre la puerta para el empleo de nuevos productos, los cuales conllevan una baja en su costo de producción y una mejora para la reputación de la empresa, mientras se mantiene o incluso se aumenta la resistencia y durabilidad del producto resultante.

La búsqueda de sustituciones en el concreto hidráulico tiene una amplia gama de proyectos en curso, ellos buscan obtener los

mejores resultados en el cumplimiento del concreto, pues, encontrar sustituciones viables puede significar no solamente un progreso en la sostenibilidad ambiental en el área de la construcción, sino también una mejora económica significativa para las empresas.

Con el fin de tratar el tema de la contaminación ambiental y los efectos que esta desata, los humanos crean técnicas relativamente modernas, dentro de las cuales una de las más utilizadas en la historia es el reciclaje. Dentro de los estudios realizados en el concreto para encontrar alternativas más ecológicas, mencionados anteriormente, se encuentra el uso del vidrio molido como sustitución parcial del cemento. En dichos estudios se tratan las diferentes variables que posee el diseño y elaboración del concreto, dichas variables corresponden principalmente al tamaño de partícula del vidrio molido y los porcentajes de sustitución.

Según antecedentes tratados en la investigación actual, se logra apreciar que los estudios realizados logran dar resultados positivos con respecto al desempeño mecánico del concreto hidráulico con sustitución parcial del cemento, se impulsa así a más investigadores a contribuir con estudios para indagar por las mezclas óptimas.

Tal como indican Fernández Arrieta, R. J. et al (2010), a diferencia del concreto hidráulico convencional, el concreto permeable utiliza una proporción de los materiales de manera distinta, la cantidad de agregado fino disminuye considerablemente, incluso puede ser inexistente, por lo tanto, el resultado de la mezcla es de agregado grueso cubierto por la pasta. De esta manera se aumenta los espacios vacíos del producto, lo cual permite obtener su característica principal: la permeabilidad. Si es cierto que el concreto hidráulico permeable posee una baja resistencia a la compresión en comparación con el

concreto hidráulico convencional, esto sucede debido a que los agregados y la pasta tienen una menor superficie de contacto, por lo tanto, una menor cantidad de enlaces entre sus componentes. No obstante, además de su permeabilidad, este concreto hidráulico tiene un menor peso unitario.

A pesar de no ser el concreto permeable comúnmente utilizado para obras estructurales, dentro de los usos que se le atribuyen a este, destaca la elaboración de superficies de tránsito bajo y liviano, tales como parqueos, calles residenciales, aceras, jardines, entre otros. Ello, pues tal como se explicó anteriormente, la resistencia a cargas altas de este tipo de concreto hidráulico está limitada.

Los concretos utilizados en el proyecto actual corresponden a un concreto permeable, se utiliza los cementos de tipo CP II F, CP II Z, CP IV y CP V. Estos concretos se realizaron con una sustitución parcial del cemento de 10% de su masa por vidrio molido transparente, de tipo sodalcal con un tamaño de partícula de 75 μm . Además, se utilizó un agregado grueso de tipo 7 según la norma ASTM C33-18, con un módulo de finura de 6,01, y un agregado fino catalogado como una arena figura según Perles, P. (2006), con un módulo de finura de 1,97.

Para la elaboración de dichos concretos se utilizó la metodología de diseño de mezcla para concretos permeables de Nguyen, D. H. (2014), el cual, según Carls, B. (2018), el método de dosificación de Nguyen es un proceso analítico, cuya principal diferencia con las demás metodologías está en que este propone una dosificación sustentada por un modelo con base en la cuantificación de la pasta de cemento necesaria para cubrir el agregado, se evita así que la cantidad de pasta incorporada sea muy pequeña para perjudicar la resistencia mecánica o muy alta para perjudicar el coeficiente de permeabilidad al obstruir los poros.

El método de Nguyen, D. H. (2014) recomienda utilizar un pequeño porcentaje de agregado fino, con este se contempla los agregados como una sola estructura. Luego, determina la cantidad necesaria de pasta para cubrir apropiadamente el agregado grueso, evitando la obstrucción de los poros dentro de la estructura granular en mención. Después, con un volumen de pasta de cemento determinado, se efectúa la prueba de drenaje, la cual consiste en determinar la relación agua/cemento (a/c), la cual

permita obtener una pasta con una consistencia suficiente para evitar el flujo de ella a la hora de vibrar o compactar el material.

Cada uno de los concretos realizados se prueba por medio del ensayo de resistencia a la compresión, el ensayo de resistencia a la flexión y ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad. Para esos ensayos se elabora 6 cilindros de concreto permeable para cada tipo de cemento, el fin es probarlos a una edad de 7 días, igual cantidad para probar a una edad de 14 y, luego, de 28 días. Por lo tanto, se realiza un total de 18 cilindros para cada uno de los cuatro concretos. Además, se elabora de igual manera 4 placas de concreto permeable en cada uno de los concretos estudiados, para utilizarlas en el ensayo de permeabilidad. Una vez realizado este último ensayo, se cortaron 2 placas de cada concreto para obtener 3 prismas de cada una de ellas, este total de 6 prismas por concreto se utilizan para ejecutar el ensayo de resistencia a la flexión.

De igual manera se efectúa la prueba de obtención del asentamiento de cada concreto estudiado, de la cual se obtuvo un resultado favorable, en donde no se presentó desmoronamiento o deslizamiento del material, esto indica los concretos contaban con una buena cohesión. Además, se realizó la prueba para la obtención de la masa específica e índice de vacíos del concreto en estado endurecido, la cual indica la diferencia entre los resultados teóricos y experimentales es significativamente poca.

Cabe mencionar que, realizar un concreto permeable control no está dentro del alcance del proyecto presente, pues el objetivo del estudio es comparar el comportamiento entre los diferentes concretos hidráulicos elaborados, y no la comparación de ellos con base en un concreto patrón.

Los resultados de los ensayos mecánicos mencionados indican que el concreto con mejor resistencia a la compresión a los 28 días corresponde al cual utilizó CP V con un resultado de 14,1 MPa, seguido por el que utiliza CP II F obteniendo 12,8 MPa, luego el que empleó CP II Z con 11,1 MPa y por último el CP IV con 9,6 MPa. De igual manera, el concreto que obtuvo el mejor resultado de resistencia a la flexión corresponde al que utilizó CP V con un resultado de 1,27 MPa.

Por otro lado, aun vez realizado el análisis estadístico, se denotó: los cuatro concretos estudiados no muestran diferencias en el valor del

coeficiente de permeabilidad según la prueba ANOVA.

Se llevó a cabo el análisis estadístico de Shapiro Wilk para conocer si cada conjunto de datos trabajados son datos normalmente distribuidos, se obtiene un resultado positivo, en donde, la totalidad de los datos utilizados poseen una distribución normal. Además, se realizó la prueba ANOVA para conocer si la variación de los resultados obtenidos de cada concreto es significativamente diferente, esta permitió conocer que los resultados de resistencia a la flexión de los concretos con CP V y CP II F no muestran diferencias, al igual que los concretos con CP II Z y CP IV. Tal como se menciona, los coeficientes de permeabilidad obtenidos son significativamente iguales según la prueba ANOVA realizada.

Gracias a los resultados obtenidos en el proyecto presente, se consigue conocer lo siguiente: para los materiales y condiciones utilizadas, el concreto que obtuvo los mejores resultados mecánicos y permeable, además del mejor desempeño aglutinante de la mezcla de cemento con 10% de vidrio corresponde al CP V. Además, al observar la cantidad de materiales requeridos para cada uno de los concretos estudiados, se denota: el concreto que utiliza CP II Z es requiere la mayor cantidad de material cementante en comparación con los demás concretos estudiados.

Introducción

El presente proyecto se basa en la necesidad de buscar propuestas y soluciones amigables con el ambiente para materiales utilizados en el ámbito de la construcción, en procura de alcanzar un desempeño factible.

La Global Cement and Concrete Association (2020) indica el concreto hidráulico es, actualmente, el material hecho por el humano más usado en el mundo. Es después del agua, el recurso más consumido. Dentro de este se conoce que, debido al proceso de obtención, el cemento es el material que implica mayor contaminación dentro de los componentes del concreto hidráulico. Por lo tanto, es preciso obtener más estudios respecto del avance de los concretos sostenibles. Para obtener esto se realiza estudios en donde se hace uso de materiales reciclados como componentes del concreto, tal como menciona Villegas Flores, N. et al (2013), el uso actual de los materiales relacionados con el impacto ambiental y los procesos constructivos poco eficientes, siguen siendo el mayor obstáculo para conseguir alcanzar la categoría de “construcción sostenible”.

Por otro lado, según Flores, V. (s.f), el vidrio representa el 7% de los residuos en la basura. Cabezas, J. et al (2019) indican: dentro de las características del reciclaje de vidrio, se presenta que el vidrio es un material ecológico, pues es un material 100% reciclable, puede ser reutilizado y reciclado innumerables veces sin perder calidad del producto.

Dentro de los estudios de tecnologías ecológicas en el concreto se encuentra el uso del vidrio molido como sustitución parcial del cemento. Los estudios actuales logran dar con resultados positivos respecto del desempeño mecánico del concreto hidráulico con sustitución parcial del cemento, impulsando a más investigadores a contribuir con estudios, para así indagar por la optimización de mezclas.

Los estudios realizados tratan diferentes variables las cuales posee el diseño y elaboración del concreto. Dichas variables corresponden

principalmente al tamaño de partícula del vidrio molido y los porcentajes de sustitución. SHAO, Y. (2000), realizó un estudio donde utilizó un porcentaje de sustitución de 30% y un vidrio molido con tamaños de 150 μ m, 75 μ m y 38 μ m. KHMIRI, A. et al. (2013), evaluó tamaños de vidrio de 100, 80, 40 y 20 μ m con un porcentaje de sustitución de 20% en un cemento CP I. De igual manera, tanto autores nacionales como internacionales estudian la diferencia en el comportamiento del concreto al variar los parámetros de porcentaje de sustitución o tamaño de partícula del vidrio. Por lo tanto, con base en falta de estudios, la presente investigación discute sobre la existencia de diferencias en el comportamiento mecánico y permeable del concreto permeable variando entre los cementos tipo CP II F, II Z, IV y V con una sustitución de un 10% de la masa de cada uno por vidrio molido.

El presente proyecto busca analizar el desempeño de concreto permeable con sustitución parcial del cemento hidráulico por residuos vítreos, variando el material cementante y su respectiva relación agua/cemento por medio de pruebas mecánicas y permeables. Para obtener esto se tiene como objetivos específicos el caracterizar los componentes para la elaboración de los concretos permeables, diseñar la mezcla de cada concreto haciendo uso de la metodología de dosificación de Engullen D. H. (2014), determinar el desempeño mecánico y el coeficiente de permeabilidad de las muestras de los concretos permeables en estudio, y finalmente analizar el efecto de la sustitución de vidrio para los diferentes cementos hidráulicos en el desempeño físico-mecánico y permeable de las muestras en estudio.

Los resultados de la investigación permiten diferenciar el comportamiento de los cementos hidráulicos en estudio bajo las condiciones mencionadas, de esta manera encontrar la mezcla que posea el mejor comportamiento mecánico y permeable, y así dar a conocer una comparación entre las alternativas en estudio.

Marco Teórico

Concreto Hidráulico

Tal como lo respalda la Global Cement and Concrete Association. (2020), el concreto hidráulico es, actualmente, el material hecho por el humano más usado en el mundo. Es, después del agua, el recurso más consumido. Portland Cement Association. (2004) lo define como una mezcla de dos componentes, agregados y pasta, en donde, los agregados se dividen entre finos y gruesos. El agregado fino suele ser arena con un tamaño máximo nominal inferior a 4.75 mm, mientras el agregado grueso suele ser grava con tamaño de entre 150 mm y 4.75 mm. El nombrado tamaño máximo nominal corresponde esencialmente al tamaño de la partícula más grande del material retenida en la malla correspondiente.

Dentro de la caracterización de los agregados se encuentra el módulo de finura. Este según Polanco Rodríguez, A. (2012), se define como un índice en el cual, cuanto mayor sea su valor, más grueso será el agregado. Al usar esta característica es posible clasificar las arenas utilizando la siguiente tabla:

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LA ARENA POR SU MÓDULO DE FINURA	
Tipo de arena	Módulo de finura
Gruesa	> 2.6
Mediana	2 – 2.6
Fina	< 2

Fuente: Perles, P. (2006)

Mientras para clasificar al agregado grueso según su tamaño de piedra se utiliza la tabla mostrada en el Apéndice 1, en donde, se recurre a los parámetros de porcentaje de material pasante en los tamices normalizados.

Por otro lado, la pasta del concreto hidráulico es el producto compuesto por materiales

cementantes, agua y aire. Gutiérrez de López, L. (2003) define los materiales cementantes como una sustancia la cual posee características aglutinantes, el material cementante utilizado para la elaboración de concreto hidráulico es el cemento hidráulico. Este, según INTECO (2015), es un material inorgánico finamente molido, se obtiene de la mezcla de material calcáreo y material arcilloso. Cuando el cemento hidráulico es expuesto al agua se crea la nombrada pasta, la cual se endurece por medio de reacciones de hidratación y enlaces químicos, en donde, una vez endurecida, consigue conservar su resistencia y estabilidad.

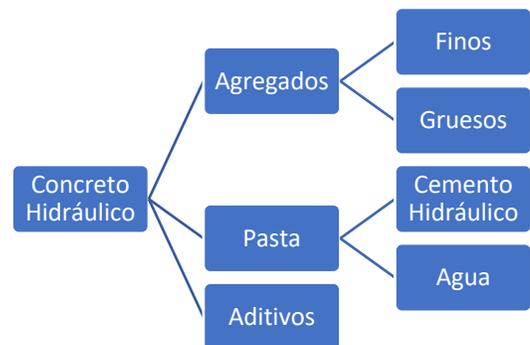


Figura 1: Diagrama de componentes del concreto hidráulico.

En el concreto hidráulico es tan importante la calidad de sus materiales como su dosificación, el proceso de elaboración y colocado, y su mantenimiento. Según Cuevas Kauffmann, R. L. (2017), estos factores son los encargados de modificar las siguientes principales propiedades del concreto hidráulico:

- Economía: Entre diferentes costos se debe de tomar en cuenta que la pasta del concreto hidráulico suele ser el componente más caro del material, así que, tanto la calidad de los agregados como su dosificación influyen en este caso.
- Trabajabilidad: Conforme se adiciona más agua a la mezcla, la plasticidad y fluidez

aumentan, por lo tanto, se tiene un concreto hidráulico más trabajable, facilitando así su elaboración, colocación y transporte. Sin embargo, simultáneamente disminuye la resistencia.

- Resistencia: El concreto hidráulico es diseñado para desempeñar una resistencia máxima a fuerzas específicas. Estas dependerán del uso que se le dé al concreto hidráulico.
- Durabilidad: Esta propiedad procura el concreto hidráulico mantenga su forma original y calidad a lo largo de su tiempo de uso, tomando en cuenta los agentes externos a los cuales será sometido.

Para lograr una mezcla de concreto hidráulico óptima se debe buscar un balance entre las propiedades anteriores, el cual cumpla con lo requerido para su uso propuesto.

De manera normativa, en Costa Rica se utiliza las normas correspondientes a los componentes, la confección, el mantenimiento y los ensayos para el concreto, las cuales se elaboran en los comités técnicos del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). El Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC) (s.f.) indica: las normas de INTECO refieren a especificaciones y metodologías de ensayos, estas permiten establecer parámetros para un control de calidad de los procesos, tanto para la confección de productos como para la mano de obra de estos. Cabe recalcar lo siguiente: las normas costarricenses se basan en las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (por sus siglas en inglés, ASTM), Asociación Española de Normalización (normas UNE), el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (por sus siglas en inglés, ANSI), el Instituto de Estándares Británico (por sus siglas en inglés, BSI), y del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (NTC).

Por otro lado, tal como indica la comercializadora brasileña de productos de construcción TECNOSIL (2019), Brasil cuenta con órganos como la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (por sus siglas en portugués, ABNT) y el Departamento Nacional de Infraestructura (por sus siglas en portugués, DNIT), los cuales, dictan las normas rectoras de todos los procedimientos correspondientes a la construcción civil en Brasil, incluyendo el ámbito del concreto. A pesar de que las normas brasileñas se rigen por los órganos

mencionados, ellas son apoyadas por la ASTM, pues esta se funda hace más de 120 años, cumple como objetivo ser una de las principales dictadoras de normas técnicas del mundo.

Tal como se menciona, el componente principal del concreto hidráulico es el cemento hidráulico, IMCYC (2009) menciona que este es un material inorgánico finamente pulverizado, el cual reacciona con el agua y posee propiedades de fraguar y endurecer. Además, este se conoce generalmente únicamente como “cemento”.

Dentro del cemento hidráulico, el tipo más utilizado es el cemento Portland, se constituye con base de Clinker y yeso, donde el Clinker se obtiene gracias a la combinación de material calcáreo y material arcilloso. El cemento Portland es el cemento más utilizado en la actualidad, por ello se realiza, diferentes tipos de cementos Portland, cada uno para un uso específico. Tal como indica Cuevas Kauffmann, R. L. (2017), los 5 principales tipos de cemento Portland son los siguientes:

- Tipo I: Es el cemento para un uso general en la construcción.
- Tipo II: También es para un uso general, sin embargo, este posee un mejor desempeño con un calor de hidratación menor o una moderada resistencia al ataque de sulfatos.
- Tipo III: Posee una alta resistencia a temprana edad debido a que fragua más rápido.
- Tipo IV: Es un cemento que posee un bajo calor de hidratación.
- Tipo V: Corresponde a una variación del cemento Portland con el fin de obtener una alta resistencia al ataque de sulfatos.

Cabe recalcar que, incluso dentro de cada uno de estos tipos, existen variaciones entre ellos, en el estudio presente se utilizan los cementos tipo CP II F-32, CP II Z-32, CP IV-32 y CP V ARI, los cuales son de fácil acceso en Brasil. Además, los cementos CP II Z y CP IV, son equivalentes a los cementos comercialmente conocidos en Costa Rica por la marca Holcim como “Industrial” y “Multi-base” respectivamente. En el Anexo 1 se muestra las características físicas y químicas para los cementos utilizados mencionados.

Concreto Permeable

A diferencia del concreto hidráulico convencional, el concreto hidráulico permeable utiliza una proporción de los materiales de manera distinta, la cantidad de agregado fino se disminuye considerablemente, incluso puede ser inexistente, por lo tanto, el resultado de la mezcla es de agregado grueso cubierto por la pasta. De esta manera se aumenta los espacios vacíos del producto, y permite así obtener su característica principal, la permeabilidad. Si es cierto que el concreto hidráulico permeable posee una baja resistencia a la compresión si se compara con el concreto hidráulico convencional. Esto sucede por cuanto los agregados y la pasta tienen una menor superficie de contacto, en consecuencia, una menor cantidad de enlaces entre sus componentes. No obstante, además de su permeabilidad, este tipo de concreto hidráulico posee un menor peso unitario.

La cantidad de espacios vacíos puede ser controlada modificando la energía de compactación utilizada y la granulometría del agregado grueso, por lo tanto, tal como indican Fernández Arrieta, R. J. y Navas Carro, A. (2010) se debe buscar un balance de permeabilidad y resistencia para lograr un desempeño adecuado del material.



Figura 2: Concreto hidráulico permeable (Fuente: Revista Construcción y Tecnología en Concreto, (2019).)

A pesar de no ser el concreto permeable comúnmente utilizado para obras estructurales, dentro de los usos que se le atribuyen a este se destaca la elaboración de superficies de tránsito bajo y liviano, tales como parqueos, calles residenciales, aceras, jardines, entre otros, esto se

debe a que, tal como se explicó anteriormente, la resistencia a cargas altas de este tipo de concreto es limitada.



Figura 3: Ciclo vía de concreto permeable (Fuente: Hidrocreto, (S.F.).)



Figura 4: Estacionamiento de concreto permeable (Fuente: ArcGIS StoryMaps, (2019).)

El uso del concreto permeable en calles, en comparación al pavimento, es favorable para la reducción del calentamiento global, pues, tal como menciona Solano Cerdas, C. (2009), el concreto permeable refleja entre el 35 y 40% de la luz solar, mientras el pavimento refleja solamente entre un 5 y 10%. Al reflejar la energía solar se evita la absorción de energía calorífica, previendo así un sobrecalentamiento de la superficie. Además, gracias al color del material, este plasma de mejor manera la luz en la oscuridad, logra reducir la cantidad de energía lumínica necesaria para su iluminación durante la noche.

El concreto permeable favorece de igual manera el reducir la contaminación sonora, esto gracias a la cantidad de poros del material, lo cual provoca las ondas de sonido se consuman en ellos

perdiendo continuamente la energía de onda y así se logra disminuir el ruido provocado en la ciudad.

Al tomar en cuenta las ventajas hidráulicas de este tipo de concreto, se encuentra, tal como respalda Solano Cerdas, C. (2009), se reduce la cantidad de agua de escorrentía que se produce en las áreas pavimentadas, de esta manera posibilita la elaboración de sistemas de drenaje con alcantarillados de menor diámetro.

Una de las ventajas más atractivas para los usuarios generalmente corresponde a la económica, se debe procurar realizar nuevas tecnologías constructivas, las cuales sean viables económicamente, de esta manera son más llamativas para el cliente. El concreto permeable es una variable del concreto hidráulico convencional. Para los usos mencionados, se torna de manera indirecta en ahorro económico para el consumidor. Tennis, P. D., Akers, D. J. y Leming, M. L. (2004) indican dentro de las ventajas económicas encontradas en el concreto permeable se tiene: debido al eficiente manejo de las aguas pluviales, se prescinde del uso de otras estructuras tales como cunetas y sumideros, además de una reducción de alcantarillas y bordillos. También, al presentar una ayuda a la eliminación del estancamiento de agua, se reduce la inversión correspondiente al manejo de tal. Otra ventaja la cual indirectamente conlleva al área económica, corresponde a la reducción de la contaminación en los cuerpos de agua. El concreto permeable, al filtrar el agua a lo largo de su espesor lleno de canales conformados por los poros, ayuda a filtrarla, así esta llega a los cuerpos de agua en condición más limpia. Dichas ventajas muestran que el uso del concreto permeable no es únicamente favorable en el ámbito ambiental o funcional, sino también pueden significar un ahorro económico para los usuarios.

Si bien se menciona que el concreto permeable conlleva una serie de ventajas en comparación con el concreto hidráulico convencional, también implica un debido mantenimiento, tal como explica Abella Rocha, C. (2018), con el pasar del tiempo el uso de este concreto provoca una pérdida de su condición permeable debido a un fenómeno llamado colmatación, el cual refiere a la obstrucción total de los poros del material mediante la acumulación de sedimentos, lo cual lleva el concreto a una condición impermeable. La autora mencionada indica lo siguiente: investigadores sugieren realizar un mantenimiento constante como

máximo cada 6 meses. Mientras, si el concreto es realizado en sitio, el mantenimiento puede llevarse a cabo al retirar y sustituir la camada externa, o efectuar un lavado con agua o al vacío para así restaurar la condición permeable del material.

Costa Rica es un fiel ejemplo de la necesidad de mejora en los sistemas de retención temporal de la escorrentía superficial, esto se muestra a lo largo de los años anteriores por causa de las inundaciones en zonas urbanas, las cuales no muestran ninguna mejora, solamente aumento de casos en la época lluviosa. Esto lo convierte en un país donde el uso del concreto permeable puede mejorar las condiciones hidráulicas urbanas y el manejo de los alcantarillados.

Abella Rocha, C. (2018) indica que los países donde este tipo de concreto se utiliza con mayor frecuencia son Estados Unidos, Francia y Japón. Sin embargo, en Brasil se utiliza desde hace aproximadamente 40 años, y las primeras aplicaciones fueron en pistas de aeropuertos y posteriormente en calles, con el objetivo de reducir la cantidad de accidentes automovilísticos. Según Abella Rocha, C. (2018), actualmente en las ciudades de Sao Paulo y Curitiba algunos tramos de aceras y estacionamientos se construyen con esta tecnología debido a la cantidad de lluvias presente en zonas de dichas ciudades.

Al igual que el concreto hidráulico convencional, el concreto permeable posee normativas para regular y parametrizar la elaboración y uso adecuado de este. Dichas normas se rigen por los órganos mencionados para el concreto hidráulico convencional.

El concreto permeable, al igual que el concreto hidráulico convencional, tiene una resistencia a la compresión dependiente del uso que se le dé al producto, de igual manera ocurriría con la permeabilidad. Sin embargo, según indica la norma ACI-522R de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) (2010), el contenido de vacíos que posee el concreto permeable puede variar entre un 18 y 35%, y su resistencia a la compresión típica entre 2,8 y 28 MPa.

Al igual que en las mezclas de concreto hidráulico convencional, en el concreto permeable la relación agua/cemento (a/c) es un parámetro sumamente importante, pues gracias a este se obtiene una mezcla con mayor o menor plasticidad. Según menciona PORRAS MORALES, J. M. (2017) en su proyecto, el concreto permeable posee relaciones a/c más bajas respecto del concreto hidráulico

convencional, siendo estas desde 0,25 hasta 0,27. El concreto permeable requiere de relaciones a/c menores, de esta manera se obtiene que el material en estado fresco tenga una textura adecuada.

Concreto sostenible

Tal como se menciona, el concreto hidráulico es un material con una demanda sumamente alta y su producción implica, de igual manera, una alta contaminación, por lo tanto, a través de los años los ingenieros y científicos se encargan de buscar soluciones y maneras de disminuir dicho impacto ambiental y buscar opciones sostenibles.

La Real Academia Española (RAE) define sostenibilidad como algo que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente.

Payá, J. (2012) menciona, en cuestión de la reutilización sostenible de residuos para la fabricación de concreto hidráulico, se considera no solamente el beneficio dado a la hora de reducir el uso de las materias primas en forma directa, sino también de forma indirecta.

La idea de realizar construcciones cada vez más sostenibles es un reto, el cual el sector de la construcción lleva a cabo a lo largo de muchos años y, aunque actualmente se posea nuevas tecnologías y mejoras para dichos problemas, se mantiene un cierto tradicionalismo en los materiales por utilizar, tal como mencionan Villegas Flores, N. y Parapinski Dos Santos, A. C. (2013), el uso actual de los materiales que se relacionan con el impacto ambiental y los procesos constructivos poco eficientes siguen siendo el mayor obstáculo para conseguir alcanzar la categoría de "construcción sostenible". Sin embargo, el mundo de la construcción debe continuar en la dirección que lleva durante los últimos años, cada vez más comprometido con el medio ambiente e innovando la industria de la construcción en busca de las soluciones sostenibles óptimas y en procura de obtener mejoras en el ámbito ambiental al mantener o incluso mejorar el desempeño de los productos.

Los estudios recientes muestran un notable progreso en el conocimiento de las alternativas sostenibles de agregados en el concreto hidráulico y nuevos aditivos químicos, así como sustituciones en componentes de la pasta, esto, tal como comenta Lorca Aranda, P (2014), abre nuevas

perspectivas para el uso del hormigón como un material de construcción moderno, los resultados de dichos estudio revelan nuevos caminos en la elaboración de concretos hidráulicos con mejoras en su resistencia e incluso en la durabilidad, a la hora de sustituir el cemento Portland.

Como se conoce, dentro de los contaminantes más grandes que implica la construcción de obras civiles se encuentra la industria cementante, la cual emite una alta cantidad de CO₂ al producir cemento Portland. Por lo tanto, cada vez es más común usar nuevas tecnologías en la sustitución de este. Dichas sustituciones muestran mejoras en su rendimiento mecánico y durabilidad. Actualmente se llevan a cabo estudios para la sustitución del cemento Portland alrededor del mundo, con lo cual, conforme pasa el tiempo se consigue resultados cada vez más optimizados y sostenibles. La idea de estas nuevas soluciones es convertir materiales de menor valor en recursos más valiosos.

A pesar de ocasionar las propuestas para sustitución del cemento una disminución en su producción, y de esta manera, se afectarían las empresas productoras, también se abre la puerta al empleo de nuevos productos, los cuales conllevan una baja en su costo de producción y una mejora para la reputación ecológica de la empresa, mientras se mantiene o incluso se aumenta la resistencia y durabilidad del producto.

Tecnologías modernas en el concreto hidráulico

El concreto hidráulico es un material utilizado desde civilizaciones antiguas y con una demanda muy alta, por lo tanto, a lo largo de la vida de este material, los ingenieros se ven en la necesidad de encontrar mejoras a problemas presentados por el material a lo largo del tiempo. Todos los estudios buscan un mismo objetivo, la optimización, encontrar diferentes maneras de crear el concreto hidráulico solucionando problemas relacionados con la resistencia, los recursos disponibles, el costo, la colocación, el transporte, la durabilidad, la sostenibilidad, entre otros factores los cuales implica la elaboración del concreto hidráulico.

Actualmente los estudios que se realiza con el fin de obtener nuevas alternativas para mejoras en el concreto hidráulico, pretenden dar soluciones que puedan ser reproducidas a nivel global,

además, soluciones viables, las cuales puedan ser probadas en laboratorio y reproducidas en el campo.

El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (2000) realizó una evaluación crítica de diversas tecnologías incorporadas en el concreto hidráulico, ellas implican avances significativos con respecto del costo de los materiales y la construcción, la durabilidad y el impacto con el medio ambiente. En esta lista se encuentran los concretos con tecnologías en aditivos, tal como los superfluidificadores, los cuales dan una alta fluidez al producto utilizando un contenido de agua relativamente bajo y permite trabajar los concretos autocompactantes. También se encuentran los concretos de alto desempeño, los cuales poseen buena trabajabilidad, una alta resistencia y gran durabilidad. A lo largo de las tecnologías descritas por el autor se distingue el alto uso de materiales complementarios a los componentes del concreto hidráulico, tanto aditivos como sustituciones.

Dentro de los estudios actuales se investiga tanto sustituciones parciales como completas de los componentes del concreto hidráulico, se encuentran desde adiciones de fibras para mejorar el desempeño de flexión del concreto hasta sustituciones parciales del cemento para favorecer el costo y desempeño mecánico del concreto.

La búsqueda de sustituciones en el concreto hidráulico posee una amplia gama de proyectos en curso, buscan obtener los mejores resultados en el cumplimiento del concreto, pues encontrar sustituciones viables puede significar no solamente un progreso en la sostenibilidad ambiental en el área de la construcción, sino también una mejora económica significativa para las empresas.

Actualmente se ejecuta proyectos de investigación de concretos, los cuales poseen una sustitución parcial o total de alguno de sus componentes y estos han obtenido resultados favorables. Por lo tanto, se demuestra así que las investigaciones siguen un buen camino, las nuevas tecnologías en el concreto hidráulico son una mejora real de la actualidad, en las cuales, su mayor atractivo es ser más amigables con el medio ambiente en comparación con él y concreto hidráulico tradicional y significan ventajas económicas para los clientes.



Figura 5: Casa de concreto con sustitución del cemento por fibras de cáñamo. (Fuente: Obras por Expansión (2017).)

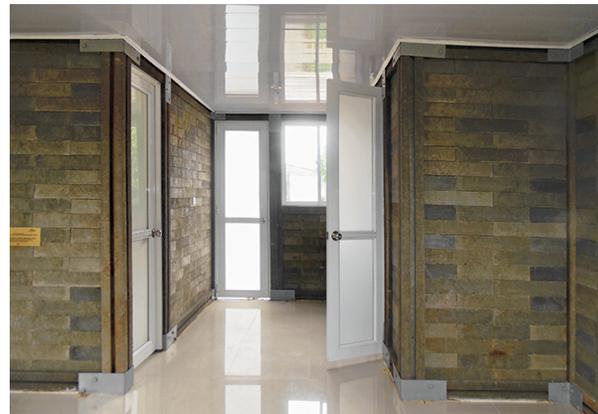


Figura 6: Bloques de concreto con sustitución del cemento por materiales plásticos. (Fuente: Obras por Expansión (2017).)

Dentro de las tecnologías estudiadas actualmente en el concreto permeable se encuentran los proyectos mostrados en el Apéndice 3. En donde, tanto los estudios de GAEDICKE, C et al.(2015) como Bosa, J. M. (2020) aportan investigaciones al amplio ámbito del uso de residuos de obras civiles como material reciclable. Estos estudios muestran un comportamiento favorable en el concreto al utilizar dicho material reciclado, y obtener resultados positivos del desempeño mecánico con respecto del concreto de referencia sin utilización del material reciclado. La opción de emplear material de otras obras ayuda a disminuir la cantidad de recursos por necesitar al elaborar concreto, a la vez, se disminuye el material de desecho en las construcciones.

Por otro lado, se presenta estudios en donde se procura utilizar recursos naturales como componentes del concreto. Entre ellos se encuentra el estudio de IBRAHIM, H. A. et al

(2016), donde utilizan corteza de palma en diferentes porcentajes de incorporación para evaluar el desempeño mecánico y permeable del concreto permeable. Con igual objetivo se tiene el estudio de Bernardo, A. et al (2018), en el cual se utiliza cáscara de arroz como agregado en el concreto permeable.

Gran cantidad de los estudios donde se utiliza recursos naturales, estos son materiales que no poseen un uso funcional más allá de su función natural, por lo tanto, al utilizarlos se le da utilidad a un material regularmente considerado como desecho.

Con respecto de los estudios referentes a adición de materiales no orgánicos reciclados en el concreto permeable, se encuentra el estudio de ZAETANG, Y. et al (2015), en donde se utiliza ceniza de combustible pulverizado. Además de los estudios que utilizan vidrio como componente del concreto permeable, tales como los mostrados en el Apéndice 3 y los indicados en el siguiente capítulo.

Vidrio Reciclable

Para tratar el tema de la contaminación ambiental y los efectos que esta desata, los humanos crean técnicas relativamente modernas, dentro de las cuales una de las más utilizadas en la historia es el reciclaje. Según Asociación Civil Argentina Pro Reciclado del PET (ARPET) (s.f), el reciclaje es el proceso en el cual los materiales se recolectan y transforman en diversos materiales para un uso nuevo. Un obstáculo presente en el reciclaje es idear el uso que se le puede dar a los materiales transformados, sin embargo, ingenieros e investigadores alrededor del mundo se dedican a realizar estudios al respecto. A pesar de poseer el reciclaje un corto trayecto histórico dentro del área socioeconómica, actualmente es mayor el número de alternativas existentes en el reciclaje de residuos, el cual, no solo brinda ventajas en aspectos ecológicos, sino también económicos. Tal como menciona Flores, V. (s.f), dar un uso a lo considerado como desecho ayuda a ahorrar materia prima, preservar los recursos naturales y reducir la producción de más residuos.

Dentro del mundo moderno del reciclaje se encuentran las investigaciones correspondientes a los usos de los desechos vítreos, al ser este un material inorgánico significa

un desecho, el cual, si no se trata de manera correcta únicamente provoca más basura acumulada. Según Flores, V. (s.f), el vidrio representa el 7% de los residuos en la basura, por lo tanto, en primera instancia, para tratar el vidrio desechado es necesario separarlo del resto de basura, se debe procurar darle un debido tratamiento para separar los componentes de los envases de vidrio antes de colocarlos en los recipientes de reciclaje, de esta manera se recortan los costos, energía y recursos para la transformación del material vítreo. Reciclar envases de vidrio significa una ayuda al ambiente, pues así se aprovecha al máximo el material y se evita este sea un recurso de uso único.

Cabezas, J. y Zamora, L. (2019) indican dentro de las características del reciclaje de vidrio se presenta que el vidrio es un material ecológico, al ser un material 100% reciclable, puede ser reutilizado y reciclado innumerables veces sin perder calidad del producto.

Según Garza, J. (14 de agosto de 2019), se estima Costa Rica cuenta con el 14% del total de vidrio que se recupera en Centroamérica para ser reciclado. Contando con aproximadamente 200 centros de acopio públicos y privados los cuales gestionan la separación y comercialización de residuos para así proveer a diferentes empresas de reciclaje. Al conocer esto, se identifica: Costa Rica cuenta con una alta cantidad de vidrio, este puede ser tratado y reciclado. Concientizar al país sobre la enorme gama de usos posibles del vidrio cuando este se recicla, es una acción que no solo significa una mejora ambiental, sino económica, por cuanto si cada persona separa debidamente el vidrio utilizado de los demás desechos, tendría la oportunidad de vender este a empresas recicladoras. Según el Centro de Acopio de Paraíso el precio actual del vidrio es de 15 colones por kilogramo. Por otro lado, tener actualmente diferentes usos del vidrio reciclado significa una oportunidad en las empresas para obtener productos de este material con un valor mucho mayor en comparación con el original.

Brasil produce aproximadamente 980 mil toneladas de envases de vidrio por año y cerca del 47% son reciclados, según CEMPRE (s.f.), en comparación con Suiza con un 95% de envases reciclados es relativamente poco, sin embargo, el objetivo de aumentar la cantidad de envases reciclados sigue en curso. En Brasil el 3% de los residuos urbanos corresponde a productos

vítreos, además, incorporar residuos de vidrio en el proceso de fabricación del propio vidrio reduce gastos de energía y agua. Según CEMPRE (s.f.), por cada 10% de residuo vítreo utilizado en la fabricación de nuevo vidrio se economiza hasta un 4% de energía y 9,5% en el consumo de agua.

Según CHEN, G. (2002), el vidrio se forma por la fusión de óxido de sílice, carbonato de sodio, dolomita y caliza en temperaturas aproximadas a los 1600°C. La Tabla 2 muestra las composiciones químicas del material en función de su color y en la Tabla 3 en función del tipo de vidrio.

TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE DIVERSOS VIDRIOS CLASIFICADOS A PARTIR DE SU COLOR.

Componente	Vidrio (% en masa)		
	Transparente	Ámbar	Verde
SiO ₂	72,42	72,21	72,38
Al ₂ O ₃	1,44	1,37	1,49
CaO	11,50	11,57	11,26
Fe ₂ O ₃	0,07	0,26	0,29
MgO	0,32	0,46	0,54
Na ₂ O	13,64	13,75	13,52
K ₂ O	0,35	0,20	0,27
SO ₃	0,21	0,10	0,07
TiO ₂	0,03	0,04	0,04

Fuente: TAHA, B. y NOUNU, G. (2008)

TABLA 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE DIVERSOS VIDRIOS CLASIFICADOS A PARTIR DE SU USO.

Componentes	Vidrio (% en masa)		
	Soda-cal	Lámparas	Cristal
SiO ₂	70,40	68,47	58,64
Al ₂ O ₃	2,06	2,26	0,02
TiO ₂	<0,01	<0,01	<0,01
Fe ₂ O ₃	<0,01	0,08	0,21
CaO	11,30	5,13	0,12
MgO	1,47	2,98	0,29
Sb ₂ O ₃	<0,01	0,08	0,22
ZnO	<0,01	<0,01	1,18
BaO	0,12	0,95	<0,01
K ₂ O	1,21	1,61	7,21
Na ₂ O	13,40	17,65	4,67
PbO	<0,01	0,79	27,43
Na ₂ O _{eq}	13,90	18,55	8,95

Fuente: BIGNOZZI, M. C. (2015)

Incorporación del vidrio molido en el concreto

Dentro de los estudios realizados en el concreto para encontrar alternativas más ecológicas mencionados anteriormente, se encuentra el uso del vidrio molido como sustitución parcial del cemento. En dichos estudios se trata las diferentes variables que posee el diseño y elaboración del concreto, las cuales corresponden principalmente al tamaño de partícula del vidrio molido y los porcentajes de sustitución. SHAO, Y. (2000), realizó un estudio donde se analiza el desempeño mecánico del concreto con una sustitución cuyo porcentaje es de 30% y un vidrio molido con tamaños de 150µm, 75µm y 38µm. Este concluyó lo siguiente: al utilizar vidrio de 38 µm se obtiene un desempeño mecánico de hasta 8% mejor que al no utilizar una sustitución de vidrio. También, KHMIRI, A., CHAABOUNI, M. y SAMET, B. (2013), concluyen: al evaluar tamaños de vidrio de 100, 80, 40 y 20 µm con un porcentaje de sustitución de 20% en un cemento CP I, se obtiene una mejora en el desempeño mecánico de un 2% al utilizar un tamaño de vidrio de 20 µm.

De esta manera se logra apreciar que los estudios actuales logran dar resultados positivos con respecto del desempeño mecánico referente al concreto hidráulico con sustitución parcial del cemento. Se impulsa así a más investigadores para contribuir con estudios, y así indagar por las mezclas óptimas.

Por otro lado, en las investigaciones en las cuales se varía el porcentaje de sustitución se tiene el estudio de SCHWARZ, N., CAM, H. y NEITHALATH, N. (2008), en el cual se utilizó un tamaño de partícula del vidrio de 75 µm, variando los porcentajes de sustitución del cemento entre 5%, 10% y 20%, se obtiene: cuanto mayor es el porcentaje de sustitución, menor es la resistencia a la compresión. Anwar A. (2016) también llevó a cabo un estudio donde se analiza el desempeño mecánico del concreto hidráulico con sustitución parcial del cemento, se utiliza un tamaño de partícula del vidrio de 75 µm y varían los porcentajes de sustitución del cemento entre 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% y 50%, concluyó que los concretos con mejor desempeño mecánico corresponden a los cuales poseían 10% y 16%. Cabe recalcar que los estudios mencionados se realizaron utilizando únicamente cemento tipo CP I.

Dentro de las investigaciones relacionadas con el tema dentro de Costa Rica, se cuenta la de Espinoza, E. (junio de 2017), quien indica que, al utilizar un tamaño de partícula de 75µm, un cemento de uso general con altas resistencias iniciales y variando el porcentaje de sustitución, obtiene los mejores resultados de comportamiento mecánico para sustituciones entre 25% y 30%.

El utilizar vidrio molido dentro de la composición del concreto no solamente impulsa el ámbito ambiental ligado al reciclaje del vidrio, sino, al sustituir un porcentaje del cemento hidráulico se provoca una disminución de su consumo en la industria de la construcción. Ello contribuye a reducir la contaminación del aire, pues la producción de cemento es responsable de una parte significativa de la emisión de gases contaminantes en la atmósfera. La Universidad Nacional de Colombia (17 de septiembre de 2015) indica, en el 2014 la industria del cemento aportó entre 2800 y 3500 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, eso constituye entre el 5% y el 8% del total de las emisiones resultantes de actividades humanas. Por lo tanto, al reducir el consumo de cemento en las mezclas de concreto, directamente se verá reducida la producción de este material y, por ende, se generará menor contaminación de parte de esta industria.

Dentro de los efectos que puede ocasionar la inclusión del vidrio molido en el concreto hidráulico se encuentra la reacción alcali-silice (RAS), BIGNOZZI, M. C. (2015) menciona que esta ocurre en el concreto cuando los agregados se encuentran en presencia de hidróxidos alcalinos y minerales de sílice. La RAS consiste en un gel de álcalis y silicato, la cual, en presencia de humedad se expande dentro del concreto según TRINDADE, G. H. (2015). Estas expansiones provocan pérdidas significativas en la resistencia mecánica y durabilidad del concreto. Un vidrio con alto porcentaje de álcalis puede llevar a una RAS si es agregado en el concreto. Sin embargo, dejando a un lado el hecho de que las condiciones en las que puede ocurrir una RAS por el uso del vidrio como sustitución parcial del cemento son poco conocidas según JANI, Y. y HOGLAND, W. (2014), quienes afirman lo siguiente: el tamaño nominal del vidrio agregado es un factor importante para su aplicación, los estudios de CORINALDESI, L. N. P. (2005), SHAO, Y. (2000), FEDERICO, L. M., CHIDIAC, S. E. (2009) y JANI, Y.; HOGLAND, W. (2014)

indican no identificar RAS en concretos con sustitución parcial del cemento por vidrio con un tamaño de partícula de 75µm o menor, y por esta razón no se recomienda utilizar este material como agregado fino.

Metodología de Nguyen

La dosificación de la mezcla de concreto es el producto obtenido al utilizar una metodología de diseño de mezcla. Se toma en cuenta que el concreto no es una ciencia exacta, existen diferentes metodologías de diseño. Conforme avanza el tiempo se procura optimizar cada método para así obtener los mejores resultados posibles, tanto en laboratorio como en campo. Según Nguyen, D. H. (2014), en concretos permeables, se debe buscar una metodología la cual se adapte a la disponibilidad de los materiales, manteniendo un equilibrio entre la resistencia y la permeabilidad con el fin de contribuir con el sistema de drenaje urbano.

Dentro de las metodologías actuales para concretos permeables se encuentra la propuesta por Engullen, D. H. (2014), esta se basa en el hecho de que la pasta de cemento únicamente juega el papel de cubrir los agregados y no de rellenar los vacíos. Según los resultados obtenidos en dicha propuesta, se consigue indicar que el método propuesto permite formular un concreto conociendo las especificaciones fijas iniciales.

Según Carl, B. (2018), el método de dosificación de Engullen es un proceso analítico, cuya principal diferencia de las demás metodologías está en proponer una dosificación sustentada por un modelo con base en la cuantificación de la pasta de cemento necesaria para cubrir el agregado. Se evita así que la cantidad de pasta incorporada sea tan pequeña como para perjudicar la resistencia mecánica o tan alta para afectar el coeficiente de permeabilidad al obstruir los poros.

El método de Nguyen, D. H. (2014) utiliza el exceso de pasta para determinar la cantidad de esta que cubre los agregados. Además, recomienda utilizar un pequeño porcentaje de agregado fino, con este se contempla los agregados gruesos y finos como una sola estructura y le otorga un diámetro a esta. Luego, determina la cantidad necesaria de pasta para cubrir apropiadamente el agregado grueso, y

evitar la obstrucción de los poros dentro de la estructura granular mencionada.

Esta metodología de diseño de mezcla determina la cantidad suficiente de agregado grueso y la cantidad adecuada de pasta de cemento. Se asume el valor de compactación de la pasta es cero. Después, con un volumen de pasta de cemento determinado, se efectúa la prueba de drenaje, consiste en determinar la relación agua/cemento (a/c) la cual permita obtener una pasta con una consistencia adecuada para evitar el flujo de ella a la hora de vibrar o compactar el material. Además, el autor recomienda compactar el concreto con una presión menor a 10 kPa y 7,5 kPa para la colocación en sitio.

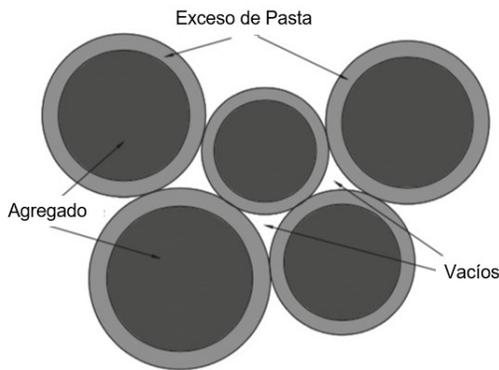


Figura 7: Muestra de la espesura del exceso de pasta. (Fuente: Nguyen, D. H. (2014))

El autor de esta metodología comenta que, a diferencia de otras metodologías de diseño de mezcla de concretos permeables, esta:

- Es aplicable a cualquier tipo de tamaño de grava.
- Muestra el método para determinar la relación a/c .
- Toma en cuenta el efecto de la compactación.

Los resultados obtenidos en la investigación de (Nguyen) poseen diferencias sumamente bajas entre los valores teóricos y reales de la masa específica y porosidad, con esto se confirma la precisión del método.

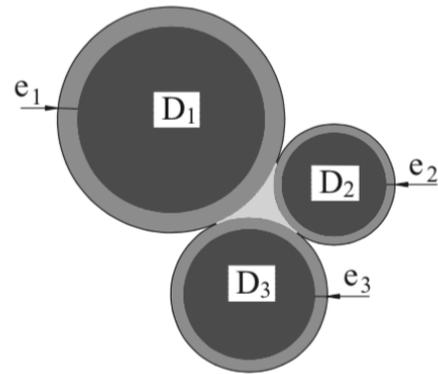


Figura 8: Espesor del exceso de pasta proporcional al diámetro del agregado. (Fuente: Nguyen, D. H. (2014))

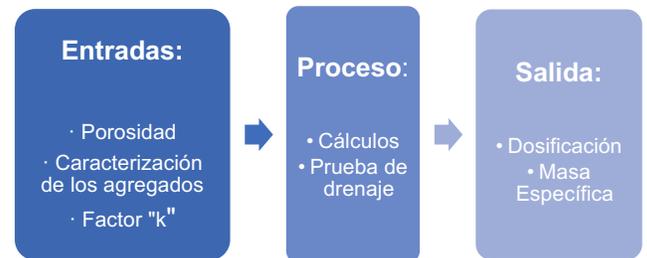


Figura 9: Flujograma de método de Nguyen, D. H. (2014). (Fuente: Carls, B. (2018))

Carls, B. (2018) realizó un estudio comparativo entre tres diferentes metodologías de dosificación, las cuales corresponden a las de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). (2010), ZHENG, M.; CHEN, S.; WANG, B. (2012) y Nguyen, D. H. (2014), utiliza materiales disponibles en el mercado de construcción brasileño. Se evaluó la resistencia a la compresión, flexión, impacto a la abrasión, porosidad, absorción de agua y permeabilidad, y se obtiene que el concreto elaborado con la metodología de Nguyen y ACI logra el mejor desempeño en la resistencia a la compresión y flexión. Además, el método de Nguyen obtuvo el mejor coeficiente de permeabilidad y las menores diferencias entre los datos teóricos y prácticos. Por lo tanto, confirma que el método de Nguyen, D. H. (2014) presenta el mejor balance entre resistencia, coeficiente de permeabilidad y durabilidad.

Cabe recalcar que este método de diseño establece elaborar los especímenes a partir del peso unitario teórico calculado, por lo tanto, no se posee una energía de compactación fija para la

elaboración de ellos, sino, estos deben cumplir con el peso unitario respectivo. De igual manera, tal como se menciona anteriormente, el autor recomienda compactar el concreto con una presión menor a 10 kPa y 7,5 kPa para la colocación en sitio.

Pruebas en el concreto

Para procurar obtener un concreto el cual cumpla con los estándares normados, este debe ser evaluado a través de diferentes pruebas y ensayos sobre muestras de elementos cilíndricos y prismáticos, para determinar su comportamiento.

Prueba masa específica e índice de vacíos

La norma ASTM C1754-12 (Método estándar de la prueba para densidad y contenido de vacíos en concreto permeable endurecido) provee el procedimiento para determinar la masa unitaria y el contenido de vacíos de especímenes de concreto permeable en estado endurecido. Esta norma indica que, los resultados de peso unitario y contenido de vacíos determinados por otros métodos de prueba podrían reportar diferencias numéricas, por lo tanto, los hace no compatibles.

El procedimiento consiste en la toma de dos masas, la primera consiste en la masa seca o masa "A", para obtenerla existen dos métodos, el primero utiliza una temperatura más baja para determinarla, donde, dependiendo de las condiciones iniciales del espécimen, obtener esta masa seca puede tardar hasta una semana si fuese necesario. Mientras el segundo método utiliza una temperatura mucho mayor, por ello se logra el resultado de manera más rápida. Bosi, J. M. (2020) recomienda utilizar el primer método de obtención de masa "A" para especímenes cilíndricos. Por otro lado, el cálculo de la masa "B" corresponde a la masa sumergida del concreto.

Una vez obtenidos los valores de dichas masas, basta con utilizar ecuaciones específicas para obtener los valores de peso unitario y porcentaje de vacíos de los cuerpos. Este procedimiento se explica de manera más amplia en la sección de "Metodología".

Cabe recalcar: el ensayo obtiene un valor de porcentaje de vacíos total, o sea, no solo toma en cuenta los poros entre los agregados del concreto, sino también los poros internos del agregado y pasta.

Tennis, P. D., Akers, D. J. y Leming, M. L. (2004) indican que la tolerancia de la comparación de los resultados teóricos y reales de los pesos unitarios es de 80 kg/m³.

Ensayo de resistencia a la compresión

Con respecto de los ensayos del desempeño mecánico del concreto, se encuentra el ensayo de resistencia a la compresión, el cual, utiliza una prensa de compresión hidráulica, la cual aplica una fuerza axial sobre los cuerpos de prueba cilíndricos llevándolos a la ruptura y se obtiene así la fuerza máxima alcanzada. Este ensayo permite obtener la resistencia a la compresión a los 28 días, conocida como "f_c". Rivera, G. A. (2009) indica que la f_c se emplea generalmente como un índice de calidad del concreto. Este parámetro representa significativamente la resistencia a la compresión total que posee el concreto, además, se utiliza en el ámbito comercial para manejar la resistencia requerida por el cliente.

Al seguir con la norma ABNT NBR 9781-13 (Piezas de concreto para pavimentación, especificación y métodos de ensayo) (basada en la norma ASTM C-979), la cantidad mínima de cuerpos de prueba necesaria para obtener resultados significativos de resistencia a la compresión corresponde a seis muestras. Cada uno de los cuerpos de prueba debe poseer las siguientes características:

- Deben ser cuerpos cilíndricos saturados en agua a 23 ± 5 °C, por lo menos durante 24 horas antes del ensayo.
- Las superficies de apoyo deben ser planas.
- Las piezas deben colocarse sobre la superficie plana del cilindro, con su coronamiento en el lado superior.

TABLA 4. CANTIDAD DE CUERPOS DE PRUEBA MÍNIMA PARA ENSAYOS.	
Muestra mínima para un lote de hasta 2500 m² de concreto	
Prueba	Cantidad
Inspección visual de piezas o placas	6
Medición de dimensiones de las piezas o placas	6
Resistencia mecánica de las piezas o placas	6
Masa específica de concreto endurecido ^a	3
Coefficiente de permeabilidad	3
a. La masa específica en estado endurecido debe ser realizada conforme con ABNT NBR 9778-87	

Fuente: ABNT NBR 16146-15

La norma ABNT NBR 16146-15 (Pavimentos permeables de concreto, requisitos y procedimientos) indica: los cuerpos de prueba deben satisfacer las siguientes resistencias para cada uso.

TABLA 5. RESISTENCIA MECÁNICA Y ESPESOR MÍNIMO DE REVESTIMIENTO PERMEABLE.			
Método de ensayo	Resistencia mecánica característica (MPa)	Espesor mínimo (mm)	Tipo de utilidad
ABNT NBR 9781	≥ 35,0 ^a	60,0	Aceras
		80,0	Tráfico leve
	≥ 20,0 ^a	60,0	Aceras
		80,0	Tráfico leve
ABNT NBR 15805	≥ 2,0 ^b	60,0	Aceras
		80,0	Tráfico leve
ABNT NBR 12142	≥ 1,0 ^c	60,0	Aceras
	≥ 2,0 ^c	100,0	Tráfico leve
a. Determinación de resistencia a la compresión. b. Determinación de resistencia a la tracción. c. Determinación de resistencia a la flexión.			

Fuente: ABNT NBR 16146-15

Por otro lado, según ACI 214R-11, los valores de la desviación estándar obtenidos en los ensayos clasifican el control de los resultados de $f'c$ tal como se muestra en Anexo 3.

Ensayo de resistencia a la flexión

El ensayo de resistencia a la flexión según la norma ABNT NBR 12142-10 (Determinación de la resistencia a la flexión de cuerpo de prueba prismáticos) (similar a la norma ASTM C78-02) se realiza sobre cuerpos de prueba prismáticos simplemente apoyados con dos fuerzas concentradas a los tercios de su longitud.

Se utiliza la misma prensa hidráulica mencionada del ensayo anterior, adicionando piezas auxiliares para apoyar los especímenes de la manera indicada en la norma.

Al igual que el ensayo anterior, se utiliza la tabla 4 para conocer la cantidad mínima de cuerpos de prueba por utilizar y la tabla 5 para conocer las resistencias mínimas que indica la norma ABNT NBR 16146-15 y su utilidad. El proceso llevado a cabo en este ensayo se encuentra en la sección de "Metodología".

Ensayo de permeabilidad

Permite conocer el coeficiente de permeabilidad (k) en placas de concreto permeable. Además, hace posible relacionar cuantitativamente la capacidad permeable de los diferentes concretos. Este parámetro refiere al flujo de líquido permitido a través del material evaluado.

La norma ABNT NBR 16146-15 explica que, para realizar el procedimiento indicado, se debe efectuar primeramente un pre-ensayo llamado "pre-mojado", el cual define la cantidad de agua que será utilizada para efectuar el ensayo final, además ayuda a saturar los poros antes de ejecutar el ensayo. Este pre-ensayo consiste en drenar una cantidad de 3,6 kg de agua a través del concreto y medir el tiempo que duraría en sobrepasar la superficie. Si este tiempo sobrepasa los 30 segundos la norma indica se debe utilizar una masa de 3,60 kg de agua en el ensayo, de lo contrario, si el tiempo es menor a 30 segundos debe utilizarse una masa de 18 kg.

El ensayo encuentra un coeficiente de permeabilidad de flujo constante, para conseguirlo

se procura que el agua vertida se mantenga en una altura entre 10 y 15 mm a un diámetro de 30 cm de la superficie de la placa de concreto.

Cabe recalcar que las placas deben colocarse con su superficie más plana en el lado superior, para así mantener las condiciones del ensayo lo más similar posible entre cada prueba.

La siguiente tabla muestra una clasificación del concreto permeable con respecto de su coeficiente de permeabilidad.

TABLA 6. VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD.	
Coefficiente de permeabilidad (mm/h)	Grado de permeabilidad del material
> 3600	Alta
3600 - 36	Media
36 - 0,36	Baja
0,36 - 0,0036	Muy Baja
< 0,0036	Prácticamente impermeable

Fuente: ABNT NBR 16146-15

Cabe recalcar: Obla, K. H. y Lobo, C. L. (mayo de 2007) indican, para considerar que los resultados obtenidos de coeficiente de permeabilidad son controlados y aceptablemente representados por el valor promedio, cada uno de estos no debe superar una diferencia del 30% del valor promedio.

Pruebas estadísticas

A la hora de realizar investigaciones las cuales requieren de un manejo cuantitativo de datos, es fundamental realizar un procedimiento de análisis estadístico. Flores Ruiz, E., Miranda Novales, M. G. y Villasís-Keever, M. A. (2017) indican: las pruebas estadísticas se aplican para establecer la probabilidad de que una conclusión dada para cada prueba, pueda aplicarse a muestras o poblaciones.

Las pruebas estadísticas se dividen con respecto de su aplicación en dos conjuntos, paramétricas y no paramétricas. Las pruebas paramétricas se aplican a conjuntos de datos que

muestren una distribución normal y de manera contraria para las pruebas no paramétricas.

Flores Ruiz, E., Miranda Novales, M. G. y Villasís-Keever, M. A. (2017) describen una manera de elección de las pruebas estadísticas, tal como se muestra en el Anexo 4, donde, se debe tomar en cuenta en primer lugar la cantidad de grupos de estudio que se posee, luego se debe diferenciar si los datos los cuales se trabajan, son cuantitativos o cualitativos, en el caso de ser cualitativos se tienen pruebas específicas para las muestras relacionadas y las muestras independientes. Mientras, si los datos son cuantitativos, se debe probar si presentan una distribución normal o no, de esta manera se tienen pruebas respectivamente si los datos son muestras relacionadas o independientes.

Prueba Shapiro-Wilk

Tal como se menciona, cuando se trabaja con datos cuantitativos, debe conocerse si los datos son normalmente distribuidos, para ello se utiliza la prueba de Shapiro-Wilk, corresponde a un método de definición de la distribución de datos, plantea lo siguiente: la hipótesis nula corresponde a que una serie de datos proviene de una distribución normal. Al igual respecto de diferentes pruebas estadísticas, se debe establecer un nivel de significancia, en donde, regularmente se establece un valor de 0,05. Al realizar la prueba se concluye si se rechaza la hipótesis nula o alternativa, esta última indica si la distribución no es normal.

Además, al tener una distribución normal, Dietrichson, A. (2019) manifiesta: los fenómenos que pueden ser medidos tanto en las ciencias exactas como las sociales se asemejan en su frecuencia a esta distribución. También, la distribución normal implica propiedades matemáticas las cuales permiten predecir si una muestra de la población pertenece a cierto rango de ella.

Una vez definido si los datos poseen una distribución normal o no, se procede a la elección de las pruebas estadísticas por efectuar.

Prueba ANOVA

El análisis de varianza de ANOVA es una prueba paramétrica, permite probar si se rechaza o no la

hipótesis nula de que las medias de dos o más poblaciones son iguales para datos normalmente distribuidos. MINITAB (2019) indica que los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores.

Para cumplir con la hipótesis nula de los ANOVA se debe cumplir que las medias de todos los grupos de datos evaluados deben ser significativamente iguales, o sea, si alguna de ellas no lo es, se rechaza la hipótesis nula.

Tal como muestra el Anexo 4, para ejecutar un ANOVA se debe contar con una serie de datos con una distribución normal. Sin embargo, MINITAB (2019) menciona que esta prueba funciona lo suficientemente bien incluso cuando no se posee dicha normalidad de datos, a menos una o más distribuciones sean realmente asimétricas.

Al ejecutar el ANOVA, este resuelve un valor "p", el cual es comparado con el nivel de significancia, si el valor "p" es mayor se concluye se cumple la hipótesis nula. El valor de significancia utilizado regularmente, al igual que en la prueba Shapiro-Wilk es de 0,05.

correlación positiva perfecta, o sea, los valores son directamente proporcionales, si el valor de una variable aumenta, la otra variable también aumentaría.

- Si el coeficiente "r" se encuentra entre 0 y 1, existe una correlación positiva, por lo tanto, hay una tendencia de los datos a ser proporcionalmente relacionados, sin embargo, no lo son en su totalidad.
- Si el coeficiente "r" es igual a 0, se indica que no existe relación lineal alguna, esto no implica que las variables sean independientes, sin embargo, no son linealmente relacionadas.
- Si el coeficiente "r" se encuentra entre -1 y 0, entonces se tiene una correlación negativa, o sea, los datos tienden a ser inversamente proporcionales, sin embargo, no lo son en su totalidad.
- Si el coeficiente "r" es igual a -1, entonces significa que las variables poseen una correlación negativa perfecta, o sea, los valores son inversamente proporcionales, si el valor de una variable aumenta, la otra variable disminuiría.

Coeficiente de correlación Pearson

Dentro de las pruebas estadísticas aplicables a datos se encuentra las pruebas comparativas y las pruebas correlativas, las últimas indican si dos o más variables están relacionadas. Una de estas pruebas estadísticas correlativas corresponde al análisis del coeficiente de correlación lineal de Pearson. Camacho Martínez, C. (s.f) indica este es un índice el cual mide el grado de coartación entre distintas variables relacionadas linealmente. O sea, este valor señala si dos variables poseen una relación lineal, sin embargo, si resultara lo contrario, no significa que los datos no poseen relación alguna, sino, no poseen una relación meramente lineal. Cabe recalcar que para obtener el valor del coeficiente de correlación de Pearson las dos variables por evaluar deben poseer la misma cantidad de datos.

A la hora de ejecutar esta prueba se obtiene el coeficiente de correlación "r", corresponde a un valor que oscila entre -1 y 1. La manera de interpretarlo es la siguiente:

- Si el coeficiente "r" es igual a 1, entonces significa que las variables poseen una

Metodología

A continuación, se describe la metodología correspondiente a las actividades ejecutadas en el proyecto, en donde, se realiza la caracterización de los materiales por utilizar, luego el procedimiento para reproducir el diseño de mezcla con la metodología de Engullen, la elaboración de los cuerpos de prueba en formas de cilindros y placas, y, por último, los ensayos de compresión axial, flexión y permeabilidad correspondientes.

Caracterización de los materiales

Vidrio molido

Se hizo la elección de utilizar el vidrio tipo “soda-cal”, pues, el estudio de BIGNOZZI, M. C. (2015) indica que, al comparar diferentes tipos de vidrios, el vidrio tipo soda-cal presenta las menores reacciones álcali-silíce. Este vidrio se utiliza para sustituir el 10% de la masa total necesaria de cemento.

Para obtener el vidrio en las condiciones requeridas para el proyecto se realizó el proceso de molido, en el cual, para comenzar a moler las piezas de vidrio transparente de tipo “soda-cal” entero, se debió realizar un cálculo correspondiente a las cantidades de peso tanto de vidrio, como de carga de bolas metálicas colocadas en la moledora tipo “Los Ángeles” tal como indica la norma ABNT NBR NM 51-01. Al tener en cuenta que la máquina permite una carga total máxima de 15 kg y según los estudios realizados por Bosi, J. M. (2020), la relación óptima de cargas para moler vidrio con tamaño de partícula de 75 μm es de 5 unidades de masa de carga a 1 unidad de masa de vidrio, se usarán 12,5

kg de bolas de metal de diferentes tamaños y 2,5 kg de vidrio.



Figura 10: Tamaño aproximado del vidrio quebrado.



Figura 11: Moledora de tipo “Los Ángeles”.

A la hora de iniciar el molido del vidrio se toma los envases de vidrio transparente de tipo soda-cal (en su mayoría botellas) debidamente lavados, sin etiquetas y con la menor cantidad de

plásticos o elementos no vítreos, y se quebraron de manera manual para obtener trozos más pequeños, tal como se muestra en la Figura 10, de esta manera se facilita el molido de ellos en la máquina. Luego, se dividió el material quebrado en diferentes recipientes con la cantidad necesaria para cada tanda en cada uno de ellos. Una vez listo el vidrio para moler se comenzó a verter el material vítreo, así como la carga metálica correspondiente sobre la máquina de “Los Ángeles”, se dejó funcionando durante 4 horas para cada tanda, y se logró al final el material vítreo molido. Para procurar que el material mencionado tuviera un tamaño de partícula de $75\mu\text{m}$ se procedió a realizar un tamizado de él sobre el tamiz $0,075\text{ mm}$ (#200), se obtiene así, debidamente preparado para utilizar en el proyecto, el material vítreo.

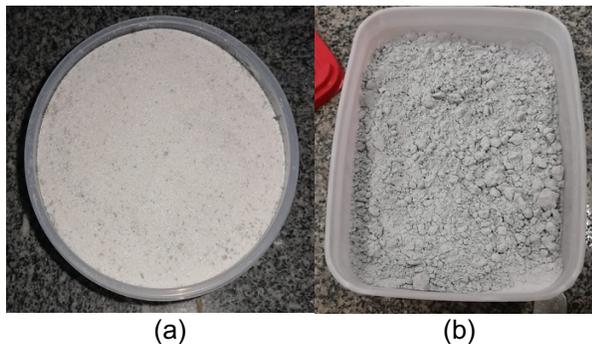


Figura 12: (a) Vidrio retenido en tamiz #200. (b) Vidrio pasante en tamiz #200.

Granulometría

La metodología de dosificación de Nguyen requiere utilizar la masa específica, absorción y granulometría de los agregados, así como la masa específica de cada uno de los cementos en estudio. También, dicha metodología precisa el valor del porcentaje de volumen vacíos y la relación entre el espesor de la capa de recubrimiento de pasta que tendrá el agregado grueso con su diámetro. Para lo indicado anteriormente, el usuario debe realizar una toma de decisiones fundamentada para establecer dichos datos.

Así, una vez listos los agregados necesarios en bodega se comenzó a realizar su caracterización. Debido a que, en su mayoría, los ensayos de caracterización requieren realizarse

con materiales en estado seco al horno, se separó una cantidad de piedra y arena del material en bodega, la cual se metió en un horno a una temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante aproximadamente 24 horas, pasado este tiempo se procedió a realizar los ensayos correspondientes para obtener la granulometría. En donde, al seguir con lo estipulado en la norma ABNT NM 248-03 (basada en la norma ASTM C 136), se toma en cuenta los tamices permitidos en la norma mostrados en la Tabla 7, debido a la disposición del laboratorio se colocaron los agregados secos sobre la pila de tamices mostrados en la Tabla 8 para el material fino y para el material grueso, ambas pilas se colocaron en la máquina vibratoria de tamizado durante 10 minutos, al finalizar, se pesaron y anotaron las masas retenidas en los tamices. Se muestran de las tablas mencionadas.

TABLA 7. SERIE DE TAMICES PERMITIDOS PARA ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA.	
Serie Normal (mm) (Sistema Americano)	Serie Intermedia (mm) (Sistema Americano)
75,00 (3")	-
-	63,00 (2 ½")
-	50,00 (2")
37,50 (1 ½")	-
-	31,50 (1 ¼")
-	25,00 (1")
19,00 (¾")	-
-	12,50 (1/2")
9,50 (3/8")	-
-	6,30 (1/4")
4,75 (#4)	-
2,36 (#8)	-
1,18 (#16)	-
0,6 (#30)	-
0,3 (#50)	-
0,15 (#100)	-

Fuente: ABNT NM 248-03

TABLA 8. TAMICES UTILIZADOS EN ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS.	
Gruesos (Sistema Americano)	Finos (Sistema Americano)
37,5 mm (1 1/2")	-
19 mm (3/4")	-
12,5 mm (1/2")	12,5 mm (1/2")
9,5 mm (3/8")	9,5 mm (3/8")
-	6,3 mm (1/4")
4,75 mm (#4)	4,75 mm (#4)
2,36 mm (#8)	2,36 mm (#8)
-	1,18 mm (#16)
-	600 µm (#30)
-	300 µm (#50)
-	150 µm (#100)

Masa Específica

Para obtener la masa específica de la arena se realizó el ensayo según lo estipula la norma ABNT NM 52-03 (Determinación de la masa específica y masa específica aparente del agregado fino) (basada en la norma ASTM C 128-84), en donde, se tomó el peso de un picnómetro de 500 ml, luego se colocó suficiente arena como para llenar el fondo del recipiente y se tomó el peso contemplando la masa del propio picnómetro, luego, se llenó el restante de este con agua al mismo tiempo que se mecía el recipiente de manera en que se procurara tener la totalidad de la arena mojada, de igual manera se tomó el peso de este, finalmente se desechó el material dentro del picnómetro y se llenó este solamente con agua, anotando el peso de este se procede a realizar los cálculos mostrados en la Tabla 12.



(a) (b) (c) (d)

Figura 13: (a) Medida ejemplo de picnómetro vacío. (b) Medida ejemplo de picnómetro con arena. (c) Medida ejemplo de picnómetro con arena y agua. (d) Medida ejemplo de picnómetro con agua.

Con respecto de la masa específica del agregado grueso, se realizó lo indicado en la norma ABNT NM 53-03 (Determinación de la masa específica, masa específica aparente y absorción del agregado grueso) (basada en la norma ASTM C 127-84), en donde, se toma una muestra del agregado seco de aproximadamente 500 g y se sumerge en agua durante 24 horas. Pasado este tiempo se coloca una balanza sobre una mesa con un hueco, de manera que se consigue colgar una canasta por debajo de la mesa atada a la balanza, se sumerge esta canasta sobre un balde lleno de agua y se vierte la piedra sobre la canasta tal como se muestra en la figura 14, se anota el peso del material sumergido y finalmente se seca superficialmente la piedra, de manera en que se procure tener el material saturado con superficie seca, de esta forma se obtiene el valor de la masa específica del agregado grueso tal como se muestra en la tabla Tabla 13.



Figura 14: Colocación del equipo para medir la masa de agregado grueso sumergida en agua.

Para obtener la masa específica de los cementos se realizó el ensayo indicado en la norma ABNT NM 16605-17, en el cual se lleva a cabo básicamente el mismo procedimiento que se efectuó para obtener la masa específica de la arena, utilizando el picnómetro de 500 ml se toma el peso de este vacío, luego se agrega una

cantidad de cemento hasta llenar el fondo del recipiente, luego se llena el restante del recipiente con agua mientras se mece para procurar tener la totalidad del material mojado y por último se toma la medida del picnómetro lleno de únicamente agua. Se repite el proceso para cada uno de los cementos en estudio para obtener el valor de masa específica de cada uno, tal como se muestran en la Tabla 15.

Absorción

Según lo indicado en la norma ABNT NM 53-03, utilizando los valores del ensayo anterior para el agregado grueso, se logra obtener la absorción del material mostrada en la Tabla 14

Siguiendo el procedimiento presentado en la norma ABNT NM 30-01 (basada en la norma ASTM C 128-84) para obtener el valor de la absorción de la arena, se comienza tomando una muestra de la arena seca y se deja sumergida en agua durante 24 horas, luego de terminado este tiempo, en el cual la arena absorbió el agua hasta estar en condición saturada, se desecha el exceso de agua presente y se coloca la arena en una zona fresca donde se le permita secar de manera natural. Al comenzar este proceso de secado se debe realizar una prueba a la arena cada 15 minutos, hasta tanto se presente en estado de saturada superficie seca, esta prueba corresponde en colocar una cantidad de arena suficiente para llenar un tronco de cono colocado sobre su diámetro mayor. Se debe realizar la cantidad necesaria de pruebas hasta se logre levantar el molde del cono y la muestra de arena dentro de él no mantenga la forma del molde.



(a)

(b)

Figura 15: (a) Consistencia de la arena al inicio del ensayo de absorción. (b) Consistencia de la arena 4 horas después del inicio del ensayo de absorción.

En el caso presente, una vez pasadas aproximadamente 4 horas del inicio del ensayo, se consiguió tener la arena en estado saturado superficie seca, se registró el peso de esta y se colocó en bandejas para ser llevada al horno, en donde permaneció durante 24 horas a una temperatura de 100 °C hasta conseguir el estado seco, finalmente se tomó el peso de la muestra seca para realizar el cálculo de la absorción de la arena, tal como se muestra en la tabla 14.

Diseño de mezcla con método de Nguyen

Una vez obtenidos los valores de las características necesarias de los materiales, se realizó la toma de decisión con respecto de los valores de porcentaje de volumen de vacíos y la proporción de la capa de recubrimiento de pasta, la cual tendrá el agregado grueso con su diámetro (k), en donde para el porcentaje de volumen de vacíos (V_v) se decidió utilizar un valor de 20%, pues Carls, B. (2018) presenta una comparación de tres metodologías de diseño de mezcla diferentes en concreto permeable, dentro de estas se encuentra el método de Nguyen utilizando un 20% de volumen de vacíos. Las tres filosofías de dosificación demuestran una buena relación entre la resistencia y la permeabilidad, o sea, no se compromete el resultado de un desempeño por el otro, sin embargo, el método Nguyen presentó los mejores resultados de resistencia mecánica y coeficiente de permeabilidad, también, con gran diferencia de las demás metodologías, el mejor desempeño a la abrasión por impacto.

Se debe recalcar que esta metodología de diseño de mezcla no basa su procedimiento en la obtención de una resistencia a la compresión esperada.

El autor de la metodología recomienda utilizar un valor de " k " de 1,116, por lo tanto, este es el valor que se utilizó. Según Nguyen, D. H. (2014), se recomienda el uso de una relación agregado fino/grueso de 0,07, teniendo así un 93,5% de agregados gruesos y un 6,5% de agregados finos.

Al tener los datos necesarios para realizar la dosificación utilizando el método de Nguyen, se procedió a realizar los cálculos correspondientes, los cuales son para un metro cúbico de concreto. Inicialmente se crea el parámetro que expresa la relación entre el volumen de agregados con dimensiones mayores a las 80 µm y el volumen total de los agregados (a) utilizando la relación:

$$a = \% \text{Agregado fino en el fondo del tamiz}$$

Así como el parámetro que indica la capacidad de absorción de agua de los agregados (b) con la siguiente ecuación:

$$b = (Ab. Ag_G * 93,5\%) + (Ab. Ag_F * 6,5\%) \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

Ab.Ag_G: Absorción del agregado grueso (%)

Ab.Ag_F: Absorción del agregado fino (%)

Utilizando estos valores junto con el valor establecido del porcentaje de volumen de vacíos (V_v) y el valor de "k", se obtuvo el volumen de agregados (V_g) utilizando la ecuación 2.

$$V_g = \frac{1-V_v}{a*(k^3-1)+1+b} \quad \text{Ec.2}$$

Tomando en cuenta la absorción de los agregados, "k", "a" y el porcentaje de volumen de vacíos, se calculó el volumen de pasta de cemento del concreto que se muestra en la tabla 16.

Tal como indica Nguyen, D. H. (2014), para conocer la relación de agua/cemento (a/c) que se utiliza en la dosificación se debe conocer el volumen de pasta de cemento en el concreto (V_p) utilizando la siguiente ecuación:

$$V_p = \beta * (1 - V_v) \quad \text{Ec.3}$$

En donde:

$$\beta = \frac{3(k-1)}{a*(k^3-1)+1+b} * \left(\frac{k+1}{2}\right)^2 \quad \text{Ec.4}$$

Luego, se debe realizar una prueba en la cual se elabora una mezcla de concreto hidráulico con una relación a/c cualquiera y esta se coloca sobre un tamiz, el cual se lleva a la máquina de vibrado de la figura 16, en donde se vibra el material por 15 segundos y se verifica si cayó pasta sobre la base bajo el tamiz tal como ocurre en la figura 17. Según Nguyen, D. H. (2014), se debe realizar la prueba con diferentes relaciones

a/c, hasta encontrar la relación a/c en cual no cayó pasta sobre la base, pero en la siguiente sí, según el autor, esta relación es la óptima para la mezcla.

Para realizar dicha prueba primeramente se calculó el tamiz necesario para los materiales en uso, para esto se utilizó la granulometría de los agregados, con la cual se calcula el diámetro medio del material, y con él, el diámetro de abertura del tamiz, este, en el caso presente resultó ser un valor de 3,19 mm, tal como se muestra en la tabla 18, por ello se utilizó el tamiz con abertura de 2,36 mm, pues es el menor más cercano. Por otro lado, para la realización de las mezclas se sigue con dosificaciones tal como se muestra en la Tabla 9, propuestas por Nguyen, D. H. (2014). En el caso en estudio se obtienen correctas las relaciones a/c mostradas en la tabla 19.

TABLA 9. CANTIDAD DE MATERIALES PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRUEBA DE DRENAJE.

Masa de Agregados: 1000 g					
a/c	Ag. Grueso (g)	Agua sat (g)	Ag. Fino (g)	Agua (g)	Masa Total (g)
0,28	935,0	3,8	65,0	74,7	1341,4
0,29	935,0	3,8	65,0	76,1	1338,5
0,30	935,0	3,8	65,0	77,4	1335,5
0,31	935,0	3,8	65,0	79,4	1335,6
0,32	935,0	3,8	65,0	80,0	1330,0
0,33	935,0	3,8	65,0	81,2	1327,4
0,34	935,0	3,8	65,0	82,4	1324,8
0,35	935,0	3,8	65,0	83,6	1322,4
0,36	935,0	3,8	65,0	84,7	1319,9
0,37	935,0	3,8	65,0	85,8	1317,7
0,38	935,0	3,8	65,0	86,8	1315,3
0,39	935,0	3,8	65,0	87,9	1313,3
0,40	935,0	3,8	65,0	88,9	1311,1
0,41	935,0	3,8	65,0	89,1	1306,3
0,42	935,0	3,8	65,0	89,7	1303,2
0,43	935,0	3,8	65,0	90,2	1299,9

Fuente: Nguyen, D. H. (2014)



Figura 16: Muestra de concreto en maquina vibratoria para prueba de relación a/c.



Figura 17: Ejemplo del experimento de obtención de la relación a/c por el método de Nguyen.

Al obtener las relaciones a/c requeridas para cada tipo de cemento hidráulico, con estas se determinó el espesor de la pasta de cemento (e) y se calculó el grado de hidratación de la mezcla (α), así como la porosidad inicial (P_0), teórica (P_P) y total (P_t), obteniendo los valores de la tabla 20.

De esta manera, tomando en cuenta los valores de masa específica de cada uno de los componentes del concreto se obtuvo la cantidad necesaria de cada uno de ellos para 1 metro cúbico de concreto mostradas en la tabla 21. Teniendo estos valores para cada una de las mezclas de concreto para cada tipo de cemento, se calculó la cantidad necesaria de materiales para cada tanda de concreto por medio de una regla de tres, tomando en cuenta la cantidad total de concreto que se desea elaborar en cada una de estas tandas. Para esto se tomaron en cuenta las especificaciones indicadas en la tabla 4 de la sección “Marco Teórico”, para así obtener la matriz experimental de cantidad de especímenes de las tablas 25, 26 y 27 de la sección de “Resultados”.

Elaboración de los especímenes de prueba

A la hora de elaborar los especímenes se definió previamente la cantidad de concreto por colocar en cada uno de los respectivos moldes. Para obtener estos valores se utilizó la masa específica de cada concreto de la Tabla 15 y se multiplicó por el volumen de cada molde para así obtener la cantidad de material necesaria en cada molde, tal como se muestra en las tablas 22 y 23. Esta cantidad posee las propiedades definidas del concreto, incluyendo la porosidad.

Por lo tanto, con esta información se realizó cada tanda de mezclado, se sigue con el proceso de mezclado de Carls, B. (2018), en donde se colocó en primer lugar el agregado grueso y se encendió la mezcladora, luego se adicionó lo correspondiente al agua de saturación de los agregados, la cual corresponde a la multiplicación del porcentaje de absorción “b” y la masa de agregados que se utilizarían, después se agregó el cemento, seguido por la mitad de la cantidad restante del agua, después se colocó el agregado fino seguido por el restante del agua, y finalmente el vidrio molido. Una vez incorporados los componentes se mezcló durante 3 minutos.

Terminado el tiempo de mezcla se procedió a realizar la prueba de asentamiento en cada uno de los concretos con sus tipos de cemento. Para realizar esta prueba se utiliza los instrumentos de la figura 18, en donde se muestra el cono de Abrams, el cual corresponde a un molde de metal con forma de tronco de cono, el cual tiene un diámetro de base de 20 cm, diámetro de la cúspide de 10 cm y una altura de 30 cm, también se muestra la varilla de acero de compactación, la cual tiene una sección transversal circular con diámetro de 16 mm y 60 cm de longitud, estos dos objetos se muestran sobre la placa de base, la cual es metálica, plana y rectangular.



Figura 18: Equipo necesario para prueba de asentamiento del concreto.

Tal como dicta la norma ABNT NM 67-98 (similar a la norma ASTM C-143) se colocó la base sobre una superficie rígida, plana y horizontal. Primeramente, se humedeció el cono y la placa de base, se colocó el cono sobre su base mayor para realizar así el llenado del concreto, el cual se divide en tres capas, cada una de estas corresponde a un tercio de la altura del molde. Cada capa se compactó con 25 golpes de la varilla, estos se distribuyeron de manera espiral comenzando por la parte exterior hacia el centro, cada golpe atravesó la capa que se estaba compactando. Al llegar a la superficie, luego de compactar la última capa, se rellenó el espacio restante y se enrasó con un movimiento rodante de la varilla. Cabe recalcar que durante el proceso del llenado el operador debe permanecer sobre los dos soportes laterales del molde, de esta manera se procura se mantenga estático sobre la superficie. Una vez lleno el molde se limpió la placa de base y se comenzó a retirar el molde de manera vertical durante entre 5 a 10 segundos. Al retirar el molde inmediatamente se volteó y se colocó al lado del concreto, luego, se situó la varilla sobre él de tal manera que un extremo de ella esté sobre el concreto y se midió la distancia entre lo superior de la mezcla y la varilla. Esta medida corresponde al asentamiento.



Figura 19: Ejemplo de medida de prueba de asentamiento del concreto.

Al terminar esta prueba se procedió a colocar la cantidad de concreto requerida para cada molde preparado previamente con su desmoldante, para compactarlo hasta obtener el 100% del molde relleno con dicha cantidad. Para efectuar la compactación de los cilindros se llevó a cabo el procedimiento manual que estipula la norma ABNT NBR 5738-15 con lo cual se realiza dos camadas de concreto en cada cilindro, se calcula primero colocar la mitad del peso y se compacta con la varilla de compactación mencionada en la prueba de asentamiento, se dan golpes hasta tanto el concreto se encuentre a la mitad de la altura del molde y se realiza lo mismo para la otra mitad del molde, hasta obtener así el molde 100% lleno con el peso de referencia. De igual manera, con respecto de la compactación de las placas, se colocó la totalidad de la cantidad de concreto en el molde y este se compactó según lo indicado en la ABNT NBR 5738-15, en donde, se colocó el concreto necesario en una sola camada y se utilizó un compactador de motor de tipo "Regla Vibratoria" el cual se pasa sobre el molde en ambas direcciones, figura 20, esta vibración finaliza cuando la superficie del concreto presenta un aspecto relativamente liso, se evita vibrar más de lo necesario para precaver se obtenga segregación.

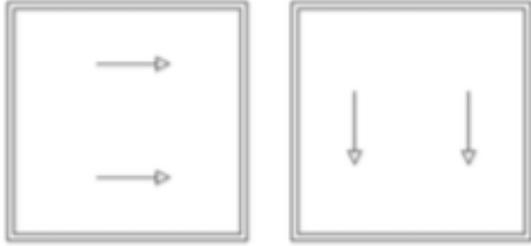


Figura 20: Sentidos de compactación de placa con regla vibratoria.



Figura 21: Compactación de las placas de concreto.

Cabe recalcar que, tal como se menciona en la sección de Marco Teórico, el método de diseño y elaboración del concreto indica no se utiliza una energía de compactación específica fija para compactar los especímenes, sino, el parámetro que estos deben cumplir es el del peso unitario, el cual se calcula tal como se señala en el capítulo anterior.

La obtención de la cantidad de especímenes de prueba realizados se obtuvo según la cantidad mínima normada, por lo tanto, se utiliza 6 especímenes de concreto para cada ensayo por realizar, los cuales corresponden al ensayo de compresión según ABNT NBR 9781-13, ensayo de flexión según ABNT NBR 12142-10, mientras para el ensayo de permeabilidad, según ABNT NBR 16416-15, se debe utilizar mínimo 3 especímenes. Tomando en cuenta esto, se elabora 6 cilindros para cada tipo de concreto a cada edad, obteniendo un total de 72 cilindros con 10 cm de diámetro y 20 cm de altura y, 4 placas para cada tipo de concreto, resulta en total 16 placas con dimensiones de 35x35x10 cm, dichas

placas serían cortadas con el fin de obtener 6 primas para cada tipo de concreto. Los especímenes realizados corresponden a la cantidad y dimensiones requeridas para cada ensayo respectivo según lo indique su norma. De esta manera se dividió el total de material por tandas de elaboración de concreto según la disposición del laboratorio.



Figura 22: Cilindros y placas después de aproximadamente 24 horas del moldeado.

Una vez listos los cuerpos de prueba en sus moldes se dejaron reposar aproximadamente 24 horas antes de desmoldarse. Pasado este tiempo se desmoldaron los especímenes y en los cilindros se realizó una capa de coronamiento, la cual consiste en una pasta sobre su base superior para garantizar una planicie en ambas bases, tal como es requerido en la norma ABNT NBR 5738-15.

Para realizar dicha capa se elaboró una pasta de cemento tipo CP V, debido a ser del cual se tiene mayor disposición en el laboratorio, el tipo de cemento para dicha pasta no debe afectar, pues, esta pasta no procura agregar resistencia al espécimen, simplemente darle una planicie en su base. El Bosi, J. M. (2020) recomienda utilizar una relación a/c de 0,4 para la realización de la pasta.

Una vez hecha la pasta, se efectúa el coronamiento según la norma ABNT NBR 5738-15, donde, se colocó un anillo el cual se ajusta alrededor del cilindro a aproximadamente 3 mm sobre su superficie superior y se ajustó hasta obtener el diámetro del cilindro. Luego se vertió una cantidad de pasta sobre este hasta rebalsar el molde, de esta manera se invirtió el cilindro y se colocó sobre una superficie completamente plana y con papel periódico mojado, de esta manera, una vez secura la pasta, esta no se empotrará sobre dicha superficie, evitando afectar el lugar de

trabajo, así como al espécimen en sí. Una vez colocados los especímenes sobre la pasta y su anillo de molde, se dejan reposar durante aproximadamente 24 horas. Pasado este tiempo, se desmoldó el anillo y se colocaron todos los especímenes bajo agua, de esta manera se comenzó el proceso de hidratación del concreto permeable.



Figura 23: Resultado de la capa de pasta.

Pasado el tiempo de curado se utiliza dos cilindros de cada tipo de cemento para ejecutar la prueba de la norma ASTM C1754-12, la cual permite conocer el valor de la masa específica y el índice de vacíos de la mezcla de concreto en estado endurecido. Para llevar esta a cabo se tomaron dichos cuerpos de prueba y se colocaron en un horno a una temperatura de 38 ± 3 °C durante 24 ± 1 horas. Pasado este tiempo se registró la masa de los cilindros, se colocaron de nuevo en el horno durante 24 ± 1 horas para tomar de nuevo su masa. La norma indica que debe repetirse este proceso hasta obtener una diferencia de masa entre un día y otro, menor a 0,5%. A la hora de obtener esta diferencia la última masa se registra como "masa A", los resultados de este procedimiento se muestran en la tabla 29, para los cuales se obtuvo una diferencia permitida después de 24 horas de la primera lectura de masa. Luego, se colocaron los especímenes bajo agua, a la hora de sumergirlos se golpearon suavemente los laterales con un mazo de hule 10 veces, esto procura eliminar el aire atrapado en los poros del concreto. Después de reposar los cilindros durante 30 ± 5 minutos bajo agua, se tomó el valor de masa sumergida de cada uno, para lograr esto se colocó el equipo de balanza, tal como se muestra en la figura 14 para la masa específica del agregado grueso, en donde se colocó cada cilindro sobre una canasta como se observa en la siguiente figura, se registra este valor como "masa B".



Figura 24: Colocación de cilindros para tomar valor de masa sumergida.

Tomando en cuenta que los cilindros se elaboraron con un diámetro de 100 mm y una altura de 200 mm, se utiliza las siguientes ecuaciones para obtener los valores de la masa específica e índice de vacíos de la tabla 30. Cabe recalcar: el valor de "K" corresponde a un factor de conversión de unidades.

$$\text{Masa Especifica (kg/m}^3\text{)} = \left(\frac{K \cdot A}{D^2 \cdot L} \right) \quad \text{Ec.5}$$

$$\text{índice de vacíos (\%)} = \left(1 - \left(\frac{K \cdot (A-B)}{\rho_w \cdot D^2 \cdot L} \right) \right) * 100 \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

$$K = 1.273.240 \left(\frac{\text{mm}^3 \text{kg}}{\text{m}^3 \text{g}} \right)$$

A = Masa "A" (g)

D = Diámetro cilindro (mm)

L = Altura cilindro (mm)

B = Masa "B" (g)

ρ_w = Masa específica del agua (kg/m³)

Ensayo de permeabilidad de los especímenes

Según indicó el doctor Bernardo, A. (3 de marzo de 2020), el ensayo de permeabilidad puede realizarse en las placas una vez pasados 14 días, por lo tanto, se realizó en primer lugar este ensayo

antes de cortar las placas y prepararlas para el ensayo de flexión a los 28 días.

El ensayo se llevó a cabo siguiendo lo descrito en la norma ABNT NBR 16416-15, en donde se requiere hacer uso de un anillo de infiltración con diámetro de 300 ± 10 mm.



Figura 25: Anillo de infiltración.

A este anillo se le colocó una pasta de calafateo en la superficie inferior para evitar la salida de agua por estos bordes.



Figura 26: Anillo de infiltración con pasta de calafateo.

Una vez preparados los materiales, se colocó el anillo sobre la cara más plana de las placas y se procede a realizar una prueba pre-ensayo, la cual permite determinar la cantidad de agua que debe utilizarse en el ensayo. Esta consiste en medir el intervalo de tiempo el cual dura en pasar una cantidad de 3,6 kg de agua. Se recalca lo siguiente: este método corresponde a un flujo constante, para obtenerlo, el agua que se utiliza tanto en la prueba pre-ensayo como en el propio ensayo debe mantener un nivel de

escorrentía de entre 10 a 15 mm, esas medidas deben plasmarse en las paredes del anillo tal como se muestra en la siguiente figura.



Figura 27: Línea de referencia de nivel en anillo.

La norma ABNT NBR 16416-15 indica: si se obtiene una duración de prueba pre-ensayo mayor a 30 segundos debe utilizarse $18 \pm 0,05$ kg de agua, de lo contrario debe utilizarse $3,6 \pm 0,05$ kg. De esta manera se realiza el ensayo con el mismo procedimiento del pre-ensayo y con la cantidad de agua obtenida de él.

Una vez obtenidos los valores de la duración del ensayo, se aplicó la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de permeabilidad (k).

$$k = \frac{C*m}{d^2*t} \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad (mm/h)

m = Masa de agua utilizada (kg)

d = Diámetro interno del anillo (mm)

t = Tiempo de duración

C = Factor de conversión de unidades para obtener resultado en mm/h (4.583.666.000)



Figura 28: Ensayo de permeabilidad en ejecución.

Ensayos mecánicos de los especímenes

Ensayo de compresión axial

Los cuerpos de prueba se mantuvieron en proceso de curado bajo agua hasta el día de sus respectivas pruebas, en donde, con respecto del ensayo de compresión según la norma ABNT NBR 9781-13, se extrajeron los cuerpos cilíndricos sumergidos en agua y se colocaron en la prensa de compresión hidráulica, La cual, tal como indica la norma ABNT NBR 9781-13, posee capacidad compatible con los ensayos por realizar, permitiendo la aplicación controlada de la fuerza sobre el espécimen colocado entre los platos de compresión.

ABNT NBR 9781-13 indica que los cuerpos de prueba deben probarse en condición saturada, por lo tanto, estos deben permanecer bajo agua a 23 ± 5 °C durante al menos 24 horas antes del ensayo. Cada espécimen se colocó sobre la placa auxiliar de manera centrada alineado con el centro del plato de compresión y sobre su cara sin capa de coronamiento.

La fuerza de compresión debe ser aplicada con una velocidad de 550 ± 200 kPa/s hasta obtener la ruptura total de la pieza. Los resultados se registran en unidades Mpa.



Figura 29: Ejemplo de colocación para ensayo de resistencia a la compresión.

Ensayo de flexión

Debido a que el ensayo de resistencia a la flexión se realiza en cuerpos de prueba prismáticos, se debe llevar a cabo la obtención de estos, para ello se realiza un corte de las placas utilizando una maquina sierra para corte de concreto, en donde se dividirían las placas en tres piezas. Se obtiene de esta manera tres prismas, estos cumplen con las dimensiones estipuladas por la norma ABNT NBR 5738-15. Una vez obtenidos los cuerpos prismáticos, vuelven a colocarse bajo agua para continuar su proceso de curado.



Figura 30: Corte de placas en sierra.



Figura 31: Prismas resultantes del corte de una placa.

A la hora de realizar el ensayo de resistencia a la flexión se deben colocar las piezas auxiliares necesarias sobre la prensa de compresión hidráulica mostrada en la siguiente figura, las

cuales cumplen con lo estipulado en la norma ABNT NBR 12142-10, donde se indica las siguientes especificaciones:

- La distancia entre los apoyos y puntos de aplicación de fuerza deben permanecer constante durante el ensayo.
- La fuerza debe ser aplicada normalmente sobre la superficie del cuero de prueba, evitando excentricidad.
- La fuerza debe ser aplicada de forma gradual y uniforme, evitando choques.



Figura 32: Colocación de equipo para ensayo de resistencia a la flexión.

Tal como se muestra en la siguiente imagen, según la norma ABNT NBR 12142-10, los apoyos inferiores deben colocarse de manera en que cumpla una distancia de 25 mm al borde del prisma, el prisma debe de colocarse con su lado mayor paralelo al eje longitudinal sobre los apoyos y centrado entre los ejes. Respecto de la base superior, se coloca de manera en que sus apoyos se ubiquen a 1/3 de la distancia entre los apoyos inferiores.

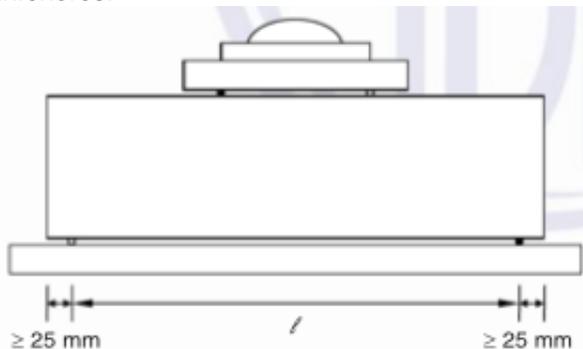


Figura 33: Especificaciones técnicas del equipo para ensayo de resistencia a la flexión (Fuente: ABNT NBR 12142-10)

Se aplicó una fuerza continua hasta obtener la ruptura de ellos. En el caso en estudio la ruptura se dio dentro del segundo tercio de la longitud del prisma, en consecuencia la norma ABNT NBR 12142-10 exige usar la siguiente ecuación para obtener la resistencia a la flexión, utilizando la fuerza máxima obtenida tal como se muestra en las tablas 37, 38, 39 y 40.

$$f_{ct,f} = \frac{F * \ell}{b * d^2} \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

$f_{ct,f}$ = Resistencia a la flexión (MPa)

F = Fuerza máxima registrada (N)

ℓ = Longitud entre apoyos inferiores (mm)

b = Longitud total del prisma (mm)

d = Altura del prisma (mm)



Figura 34: Ruptura de prisma en prueba de flexión.

Pruebas estadísticas

Al utilizar la tabla del Anexo 4, se observa que, al obtener datos normalmente distribuidos, se decide realizar el ANOVA. Por lo tanto, enseguida, se describe el procedimiento de la ejecución de las pruebas estadísticas de Shapiro Wilk, ANOVA y coeficiente de correlación de Pearson.

Prueba de Shapiro Wilk

La prueba Shapiro Wilk posee una hipótesis nula, consiste en que la distribución de los datos es normal. Esta busca probar si se puede afirmar o no dicha hipótesis.

En la ejecución de esta prueba se toma los resultados obtenidos de ensayos, en el caso actual corresponden a poblaciones de 6 valores para los ensayos de resistencia a la compresión y flexión y 4 valores para el ensayo de permeabilidad.

1. Se calculó la media (MED) del grupo de valores.
2. Se calculó el cuadrado de la suma de las diferencias entre cada dato y la media ($\sum(X_i - \text{MED})^2$).
3. Se utilizó el valor de la cantidad de datos por evaluar en las tablas del Anexo 5 para obtener los valores del coeficiente a_i .
4. Luego, se obtuvo la diferencia respectiva entre los datos en orden ascendente y orden descendente ($\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$)
5. Se realizó una multiplicación entre los valores a_i y las últimas diferencias mencionadas ($a_i * \text{Dif}$)
6. Multiplicando el valor anterior por ($\sum(X_i - \text{MED})^2$) se obtuvo el coeficiente de Shapiro-Wilk (SWc)
7. Con el coeficiente SWc y las tablas del Anexo 5 se obtuvo el nivel de significancia correspondiente (p-value). Este valor es comparado con un nivel de significancia de 0,05.
8. Si el valor p-value es mayor a 0,05, entonces no se rechaza la hipótesis nula propuesta.

Prueba de ANOVA

El análisis de variación ANOVA busca definir si se rechaza la hipótesis nula de que las medias de los datos en análisis son iguales.

Para obtener el resultado de esta prueba utilizando un nivel de confianza de 95%, es necesario aplicar los siguientes pasos:

1. Obtener la suma de los valores de cada grupo ($\sum X_i$).
2. Se eleva al cuadrado cada uno de los datos y se obtiene la suma de cada grupo ($\sum X_i^2$).
3. Se aplica las siguientes ecuaciones para obtener el valor de suma de cuadrados total (SC total), de intragrupos (SC intragrupos) y dentro de los grupos (SC entre grupos)

$$SC \text{ total} = \sum(\sum X_i^2) - \frac{(\sum(\sum X_i))^2}{N} \quad \text{Ec.9}$$

$$SC \text{ entre grupos} = \sum\left(\frac{(\sum X_i)^2}{n_i}\right) - \frac{(\sum(\sum X_i))^2}{N} \quad \text{Ec.10}$$

$$SC \text{ intragrupos} = SC \text{ total} - SC \text{ entre grupos} \quad \text{Ec.11}$$

4. Se aplica las siguientes ecuaciones para obtener el valor de grados de libertad total (gl total), de intragrupos (gl intragrupos) y dentro de los grupos (gl entre grupos), cabe recalcar que el valor "r" hace referencia a la cantidad de grupos:

$$gl \text{ total} = N - 1 \quad \text{Ec.12}$$

$$gl \text{ entre grupos} = r - 1 \quad \text{Ec.13}$$

$$gl \text{ intragrupos} = N - r \quad \text{Ec.14}$$

5. Se divide las sumas de los cuadrados entre grupos e intragrupos por los grados de libertad correspondientes para obtener la media de los cuadrados.
6. Se divide la media de los cuadrados entre grupos entre la media de los cuadrados intragrupos para obtener el valor "F".
7. Se utiliza los grados de libertad para un nivel de significancia del 95% tablas del Anexo 6 para obtener el valor de valor crítico para F.
8. Si el "F" es mayor que el valor crítico entonces se rechaza la hipótesis nula.

En el estudio actual se evalúa resultados de la resistencia a la compresión de los diferentes concretos utilizados para cada una de las edades del ensayo, de igual manera se realiza la prueba en el ensayo de resistencia a la flexión y el de permeabilidad, tal como se muestra en las tablas del Apéndice 2.

Coefficiente de correlación de Pearson

El valor del coeficiente de correlación de Pearson indica si los datos de dos variables poseen una relación lineal o no, para obtener este valor se debe aplicar el método de la siguiente manera:

1. Se multiplican linealmente los datos de la variable "X" y la variable "Y", y se suman los productos para obtener " $\sum X_i Y_i$ ".

2. Se multiplican las medias de ambas variables. ($MEDX * MEDY$)
3. Se aplica la siguiente ecuación para obtener la covarianza de las variables (σ_{xy}), tomando en cuenta la cantidad de datos de cada variable (n):

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum X_i Y_i}{n} - (MEDX * MEDY) \quad \text{Ec.15}$$

4. Se obtienen las desviaciones estándar de la totalidad de cada una de las variables (σ_x y σ_y).
5. Se aplica la siguiente ecuación para obtener el valor del coeficiente de correlación Pearson "r":

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y} \quad \text{Ec.16}$$

6. Por último, se evalúa el resultado del coeficiente con los parámetros descritos en la sección de "Marco Teórico".

Resultados

Caracterización de los materiales

En las tablas 10 y 11 se muestra los resultados correspondientes a la obtención de la granulometría de los agregados, mientras en las tablas 12, 13 y 15 se encuentran los cálculos de las masas específicas, tanto de los agregados como de cada uno de los cementos, finalmente, en la tabla 14 presenta el porcentaje de absorción que poseen los agregados utilizados en el estudio.

TABLA 10. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADOS GRUESO			
Masa inicial: 5,005 kg			
Ø de Tamiz (mm)	Masa Retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado
37,50	0,0	0,0	0,0
19,00	0,0	0,0	0,0
12,50	65,0	1,3	1,3
9,50	685,0	13,7	15,0
4,75	3540,0	70,7	85,7
2,36	715,0	14,3	100,0
1,18	0,0	0,0	100,0
0,60	0,0	0,0	100,0
0,30	0,0	0,0	100,0
0,15	0,0	0,0	100,0
Fondo (<0,15)	0,0	0,0	100,0
Suma	5005,0	-	-
D. Máx. Caract. (mm)	19	Módulo de Finura	6,01

$$\text{Módulo de Finura} = \frac{\sum(\% \text{Acumulado sobre el fondo})}{100}$$

Ec.17

TABLA 11. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADOS FINO			
Masa inicial: 804,63 g			
Ø de Tamiz (mm)	Masa Retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado
12,50	0,0	0,0	0,0
9,50	0,0	0,0	0,0
6,30	0,0	0,0	0,0
4,75	0,0	0,0	0,0
2,36	19,1	2,4	2,4
1,18	64,8	8,1	10,4
0,60	186,3	23,2	33,6
0,30	228,1	28,4	61,9
0,15	214,0	26,6	88,5
Fondo (<0,15)	92,3	11,5	100,0
Suma	804,6	-	-
D. Máx. Caract. (mm)	4,75	Módulo de Finura	1,97

TABLA 12. MASA ESPECÍFICA DEL AGREGADO FINO.	
Masa picnómetro vacío (g) (P1)	140,60
Masa picnómetro + muestra (g) (P2)	286,20
Masa picnómetro + muestra + agua (g) (P3)	708,20
Masa picnómetro + agua (g) (P4)	617,40
Masa Específica (g/cm ³)	2,66

$$Masa\ Esp.\ Agregado\ Fino = \frac{P2-P1}{(P4-P1)-(P3-P2)} \quad Ec.18$$

TABLA 13. MASA ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO	
Masa muestra (g) (M1)	501,95
Masa saturada (g) (M2)	502,64
Masa inmersa (g) (M3)	320,98
Masa Específica (g/cm ³)	2,76

$$Masa\ Esp.\ Agregado\ Grueso = \frac{M1}{M2-M3} \quad Ec.19$$

TABLA 14. ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS.		
	Agregado Grueso	Agregado Fino
Masa Saturada Superficie Seca (g) (M1)	502,64	600,00
Masa Seca al Horno (g) (M2)	501,95	575,00
Absorción (%)	0,14	4,35

$$\%Absorción = \frac{M2-M1}{M1} * 100 \quad Ec.20$$

TABLA 15. MASA ESPECÍFICA DE LOS CEMENTOS EN ESTUDIO.	
Tipo de cemento	Masa Específica (g/cm ³)
CP II F	3,02
CP V	2,97
CP II Z	2,95
CP IV	2,83

Diseño de mezcla con método de Nguyen

Las siguientes tablas corresponden a los resultados de los cálculos necesarios para obtener el diseño de mezcla de cada uno de los concretos permeables con diferentes tipos de cemento según la metodología del Nguyen, D. H. (2014).

Los resultados de las tablas 16 y 17 se obtienen por medio de las ecuaciones mostradas en la sección de Metodología.

TABLA 16. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE AGREGADOS QUE SERÁN INCORPORADOS EN EL COCRETO.	
Variable	Valor
V _v (%)	20%
Agregado fino retenido en el fondo del tamiz (%)	11,7%
a (%)	99,24%
k	1,116
b _{ag} (%)	0,10%
b _{am} (%)	4,35%
b _{ap} (%)	0,38%
V _g (m ³)	0,575

Variable	Valor
β	0,2801
$V_p(m^3)$	0,2241

Tipo de cemento	Relación a/c
CP II F	0,38
CP V	0,39
CP II Z	0,37
CP IV	0,43

Agregado	Tamiz (mm)	% Retenido
Grueso	12,50	1,3%
	9,50	13,7%
	4,75	70,7%
	2,36	14,3%
Fino	4,75	0,0%
	2,36	2,4%
	1,18	8,1%
	0,60	23,2%
	0,30	28,4%
	0,15	26,6%
D_i (mm)		4,85
D_p (mm)		3,19

Variable	CP II F	CP V	CP II Z	CP IV
e	0,28 mm			
α	0,735	0,735	0,716	0,768
P_0	54,29%	54,93%	53,62%	57,33%
P_p	36,72%	37,38%	36,02%	39,96%
P_t	28,23%	28,38%	28,07%	28,95%

$$e = \frac{(k \cdot D_i) - D_i}{2} \quad \text{Ec.23}$$

$$\alpha = 1 - \exp(-3,4 * a/c) \quad \text{Ec.24}$$

$$P_0 = \frac{a/c}{a/c + 0,32} \quad \text{Ec.25}$$

$$P_p = P_0 - 0,53 * \alpha * (1 - P_0) \quad \text{Ec.26}$$

$$P_t = \beta * P_p * (1 - V_v) + V_v \quad \text{Ec.27}$$

$$D_i = \sum(Ag_G \text{ Ret.} * \text{Tamiz} * 93,5\%) + \sum(Ag_F \text{ Ret.} * \text{Tamiz} * 6,5\%) \quad \text{Ec.21}$$

$$D_p = 1,44 + 0,36 * D_i \quad \text{Ec.22}$$

Tipo de cemento	Total cemento requerido (kg)	Cemento a dosificar (kg)	Vidrio a dosificar (sustitución de 10%) (kg)	Agregado Fino (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agua (kg)
CP V	308,14	277,33	30,81	103,05	1482,37	108,16
CP IV	286,18	257,56	28,62	103,05	1482,37	110,75
CP II F	315,03	283,53	31,50	103,05	1482,37	107,74
CP II Z	316,24	284,62	31,62	103,05	1482,37	105,31

TABLA 22. MASA RESPECTIVA EN CILINDROS PARA CADA TIPO DE CONCRETO.			
Tipo de cemento	Dimensiones	Volumen (cm ³)	Masa en molde (g)
CP II F	∅ = 10 cm h = 20 cm	1570,80	3154,57
CP V			3152,53
CP II Z			3144,39
CP IV			3113,87

TABLA 25. MATRIZ EXPERIMENTAL DE CILINDROS PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL.				
Tipo de cemento	Cantidad de cilindros			
	7 días	14 días	28 días	Total
CP IV	6	6	6	18
CP V	6	6	6	18
CP II F	6	6	6	18
CP II Z	6	6	6	18
TOTAL				72

TABLA 23. MASA RESPECTIVA EN PLACAS PARA CADA TIPO DE CONCRETO.			
Tipo de cemento	Dimensiones	Volumen (cm ³)	Masa en molde (g)
CP II F	(10x35x35) cm	12250	24601,19
CP V			24585,26
CP II Z			24521,81
CP IV			24283,79

TABLA 26. MATRIZ EXPERIMENTAL DE PRISMAS PARA ENSAYO DE FLEXIÓN.	
Tipo de cemento	Cantidad de prismas
	28 días
CP IV	6
CP V	6
CP II F	6
CP II Z	6
TOTAL	24

TABLA 24. MASA ESPECÍFICA TEÓRICA DE CADA CONCRETO	
Tipo de cemento	Masa Especifica (kg/m ³)
CP II F	2008,3
CP II Z	2007,0
CP V	2001,8
CP IV	1982,4

TABLA 27. MATRIZ EXPERIMENTAL DE PLACAS PARA ENSAYO DE PERMEABILIDAD	
Tipo de cemento	Cantidad de placas
CP IV	4
CP V	4
CP II F	4
CP II Z	4
TOTAL	16

Prueba de asentamiento, índice de vacíos y masa específica

Las siguientes tablas representan los resultados obtenidos al realizar la prueba de asentamiento según la norma ABNT NM 67-98, además de los resultados de índice de vacíos y masa específica obtenidos experimentalmente con la norma ASTM C1754-12, la cual se realiza a los cuerpos de prueba de concreto endurecido. Estos últimos permiten realiza una comparación con los resultados base obtenidos teóricamente tal como se muestra en las tablas 31 y 32.

Tipo de cemento	Resultado (mm)
CP II F	25
CP V	20
CP II Z	25
CP IV	20

Tipo de cemento	Espécimen	Día 1 (kg)	Día 2 (kg)	Diferencia
CP II F	1	3098,69	3091,85	0,1%
	2	3107,29	3103,50	0,2%
CP V	1	3109,25	3101,90	0,2%
	2	3086,86	3082,77	0,1%
CP II Z	1	3099,70	3096,78	0,1%
	2	3097,00	3093,35	0,1%
CP IV	1	3049,42	3045,53	0,2%
	2	3066,63	3061,46	0,1%

Tipo de cemento	Espécimen	Masa A (g)	Masa B (g)	Índice de vacíos (%)	Promedio índice de vacíos (%)	Masa específica (kg/m ³)	Promedio masa específica (kg/m ³)
CP II F	1	3091,85	1906,83	24,56	24,42	1968,33	1972,04
	2	3103,50	1914,17	24,28		1975,75	
CP V	1	3101,90	1943,25	26,24	25,50	1974,73	1968,64
	2	3082,77	1900,81	24,75		1962,55	
CP II Z	1	3096,78	1906,07	24,20	24,43	1971,47	1970,38
	2	3093,35	1909,89	24,66		1969,29	
CP IV	1	3045,53	3045,53	25,60	23,98	1938,85	1943,92
	2	3061,46	3061,46	22,36		1948,99	

TABLA 31. COMPARACIÓN ENTRE LA MASA ESPECÍFICA REAL Y TEÓRICA

Tipo de cemento	Masa específica Real (kg/m ³)	Masa específica Teórica (kg/m ³)	Diferencia
CP II F	1972,04	2008,3	1,84%
CP V	1968,64	2001,8	1,68%
CP II Z	1970,38	2007,0	1,86%
CP IV	1943,92	1982,4	1,98%

TABLA 32. COMPARACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE VACÍOS REAL Y TEÓRICO

Tipo de cemento	Índice de vacíos Real (%)	Índice de vacíos Teórico (%)	Diferencia
CP II F	24,42	28,23	15,59%
CP V	23,90	28,07	14,91%
CP II Z	24,43	28,38	18,72%
CP IV	23,98	28,95	20,71%

Ensayos mecánicos

A continuación, se presenta las tablas y gráficos de los resultados de los ensayos mecánicos, en donde se muestra los resultados de resistencia a la compresión axial, para cada uno de los concretos en estudio en tres edades diferentes, así como su respectiva curva de comportamiento, luego, se muestran las tablas de resultados del ensayo de resistencia a la flexión en primas a la edad de 28 días y un gráfico tipo caja mostrando su comportamiento independiente.

Finalmente presentan gráficos de dispersión comparando las siguientes características resultantes: Resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, porcentaje de

participación del cemento en la mezcla, así como del vidrio, porcentaje de vacíos, relación a/c y peso unitarios.

TABLA 33. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II F Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Edad	Espécimen	Resultado (MPa)	Prom. (MPa)	Desv. Est. (MPa)
7 días	1	8,6	9,4	0,5
	2	9,5		
	3	9,9		
	4	9,4		
	5	9,9		
	6	9,0		
14 días	1	12,4	12,1	1,1
	2	13,5		
	3	12,1		
	4	10,3		
	5	12,8		
	6	11,6		
28 días	1	11,2	12,8	1,4
	2	14,5		
	3	12,6		
	4	13,0		
	5	11,4		
	6	14,1		

TABLA 34. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP V Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO				
Edad	Espécimen	Resultado (MPa)	Prom. (MPa)	Desv. Est. (MPa)
7 días	1	9,7	11,8	1,7
	2	11,0		
	3	11,3		
	4	11,3		
	5	12,9		
	6	14,7		
14 días	1	11,6	12,8	0,9
	2	12,2		
	3	12,5		
	4	12,9		
	5	13,7		
	6	14,0		
28 días	1	12,5	14,1	1,7
	2	12,8		
	3	13,2		
	4	13,8		
	5	15,4		
	6	17,0		

TABLA 35. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II Z Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO				
Edad	Espécimen	Resultado (MPa)	Prom. (MPa)	Desv. Est. (MPa)
7 días	1	9,7	10,7	0,8
	2	9,9		
	3	10,6		
	4	10,7		
	5	11,2		
	6	11,8		
14 días	1	9,5	10,9	0,9
	2	10,4		
	3	10,8		
	4	10,9		
	5	11,6		
	6	11,9		
28 días	1	9,5	11,1	1,0
	2	10,1		
	3	11,5		
	4	11,7		
	5	11,9		
	6	11,9		

TABLA 36. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP IV Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Edad	Espécimen	Resultado (MPa)	Prom. (MPa)	Desv. Est. (MPa)
7 días	1	5,0	7,1	1,2
	2	6,6		
	3	7,0		
	4	7,7		
	5	8,0		
	6	8,2		
14 días	1	8,0	8,7	0,5
	2	8,3		
	3	8,7		
	4	8,9		
	5	9,0		
	6	9,5		
28 días	1	8,9	9,6	0,8
	2	9,1		
	3	9,2		
	4	9,3		
	5	10,2		
	6	11,1		

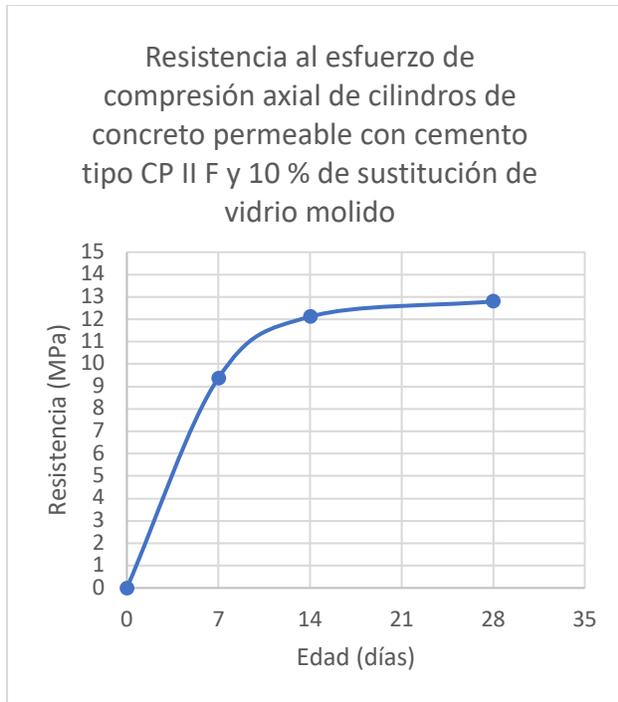


Figura 35: Resistencia al esfuerzo de compresión axial de cilindros de concreto permeable con cemento tipo CP II F y 10% de sustitución de vidrio molido.

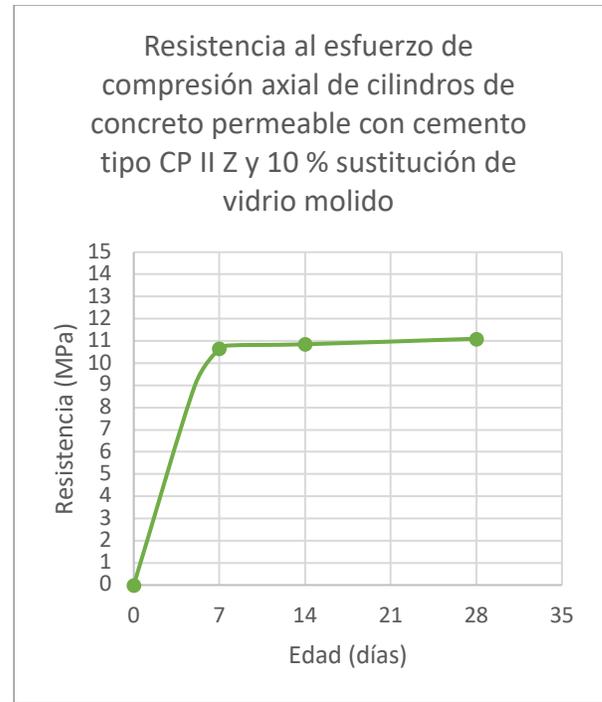


Figura 37: Resistencia al esfuerzo de compresión axial de cilindros de concreto permeable con cemento tipo CP II Z y 10% de sustitución de vidrio molido.

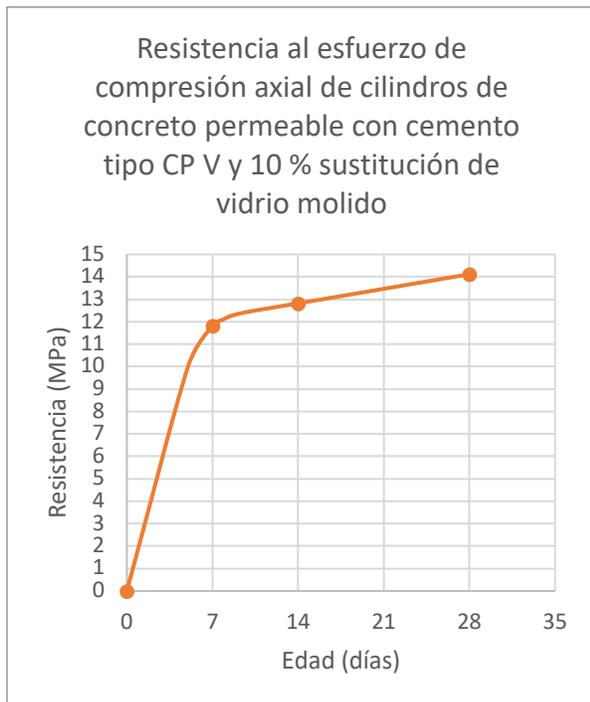


Figura 36: Resistencia al esfuerzo de compresión axial de cilindros de concreto permeable con cemento tipo CP V y 10% de sustitución de vidrio molido.

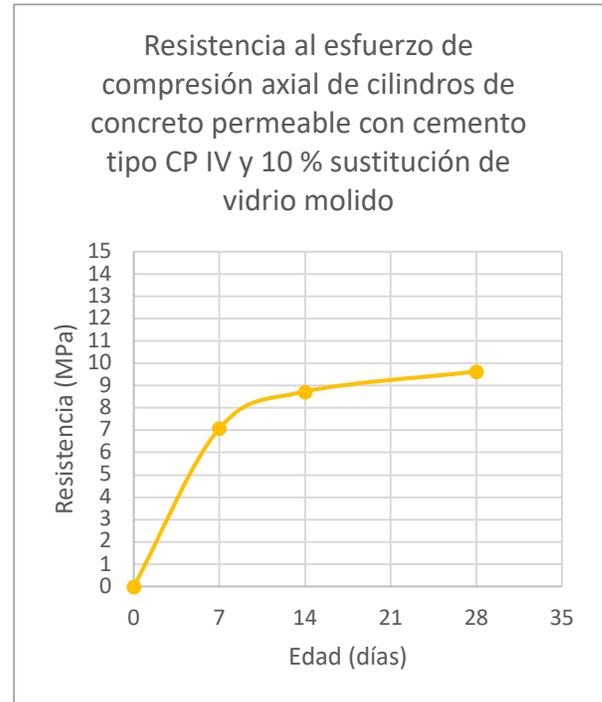


Figura 38: Resistencia al esfuerzo de compresión axial de cilindros de concreto permeable con cemento tipo CP IV y 10% de sustitución de vidrio molido.

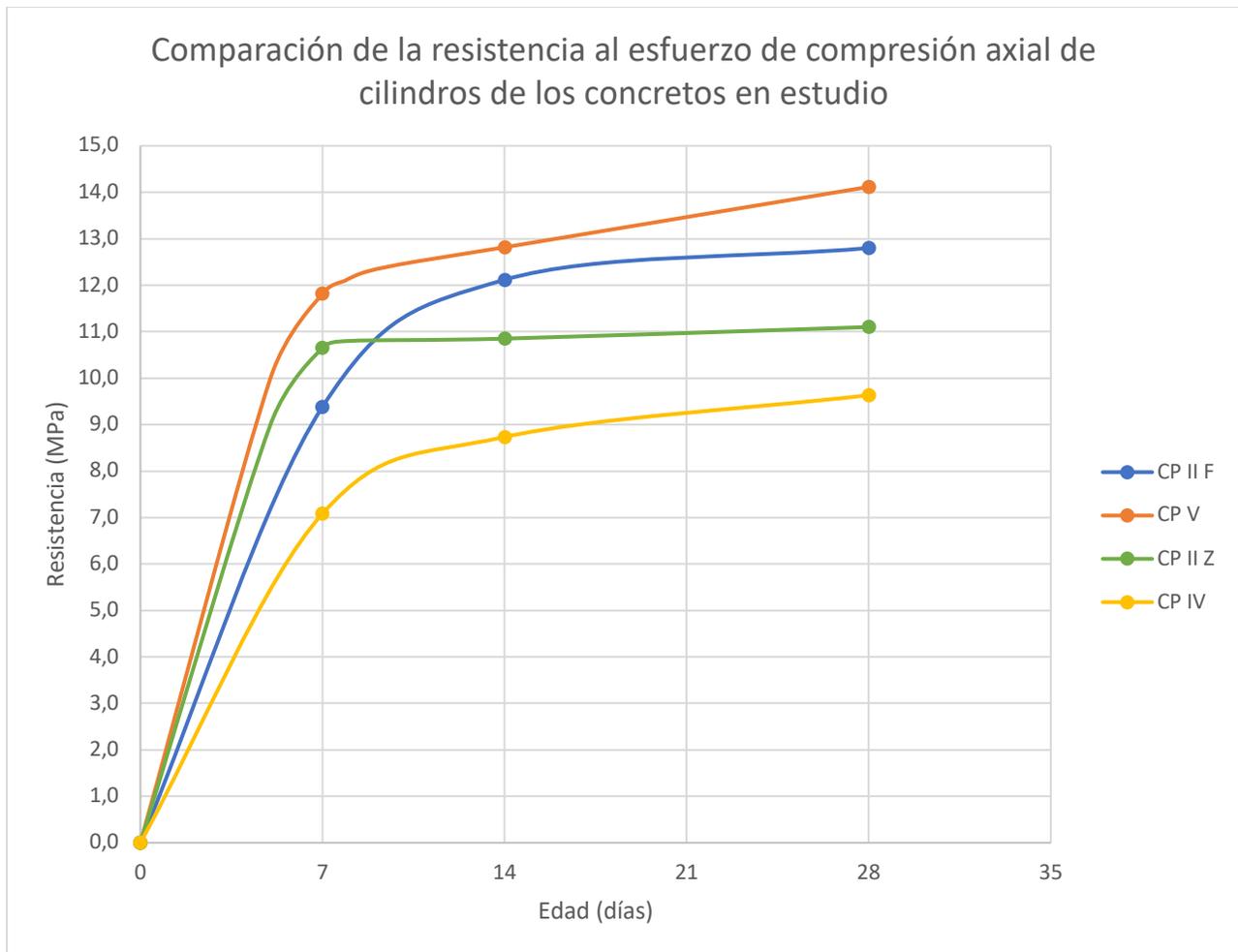


Figura 39: Comparación de la resistencia al esfuerzo de compresión axial de cilindros de los concretos en estudio.

TABLA 37. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE PRISMAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II F Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Espécimen	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Espesor (mm)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desv. Est. (MPa)
1	1538	15083	100	1,29	1,25	0,047
2	1456	14278	100	1,22		
3	1468	14396	100	1,23		
4	2132	20908	120	1,24		
5	2389	23428	130	1,19		
6	2645	25939	130	1,32		

TABLA 38. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE PRISMAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP V Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Espécimen	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Espesor (mm)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desv. Est. (MPa)
1	1981	19427	110	1,38	1,27	0,064
2	1794	17593	110	1,25		
3	1433	14053	100	1,20		
4	1783	17485	110	1,24		
5	1456	14278	100	1,22		
6	3053	29940	140	1,31		

TABLA 39. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE PRISMAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II Z Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Espécimen	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Espesor (mm)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desv. Est. (MPa)
1	1876	18397	120	1,10	1,08	0,048
2	1877	18407	120	1,10		
3	1328	13023	105	1,01		
4	1468	14396	105	1,12		
5	1608	15769	110	1,12		
6	1468	14396	110	1,02		

TABLA 40. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE PRISMAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP IV Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Espécimen	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Espesor (mm)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desv. Est. (MPa)
1	1631	15995	115	1,04	1,11	0,062
2	1992	19535	120	1,16		
3	1538	15083	110	1,07		
4	1829	17936	115	1,16		
5	1537	15073	110	1,07		
6	1701	16681	110	1,18		

$$Resistencia\ a\ la\ flexión = \frac{Fuerza(N) \cdot largo\ entre\ apoyos(mm)}{largo\ total(mm) \cdot altura^2}$$

Ec.28

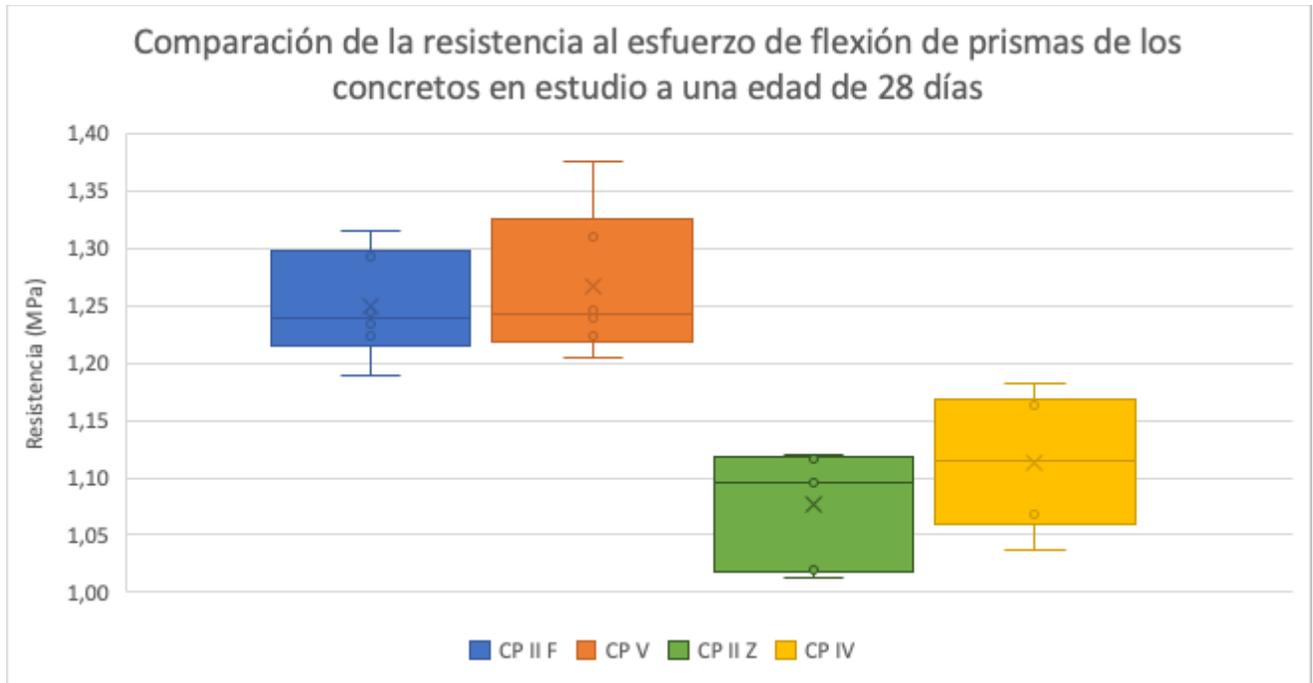


Figura 40: Comparación de los resultados de resistencia al esfuerzo de flexión de prismas a los 28 días de los concretos en estudio.

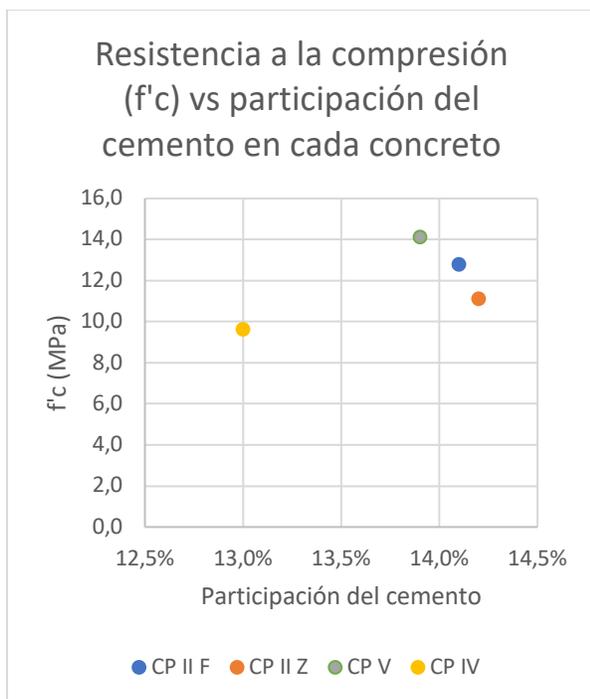


Figura 41: Comparación de la resistencia al esfuerzo de compresión a los 28 días (f'c) y la participación del cemento en cada concreto.

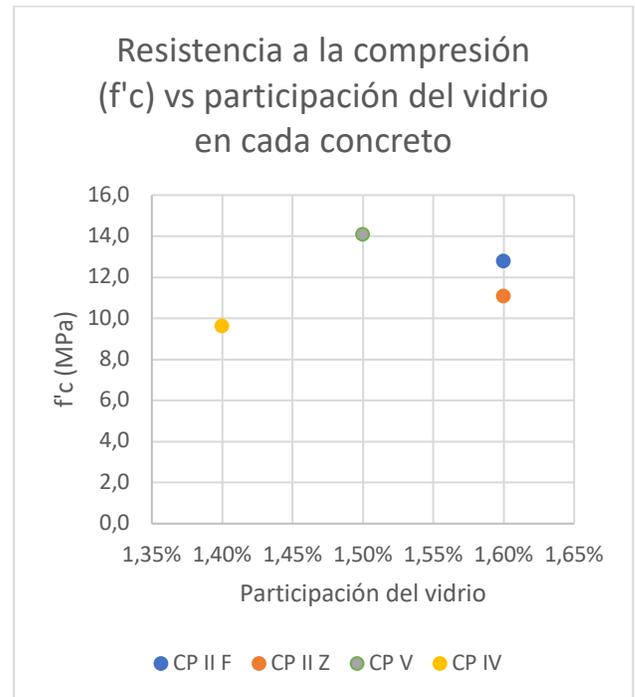


Figura 42: Comparación de la resistencia al esfuerzo de compresión a los 28 días (f'c) y la participación del vidrio en cada concreto.

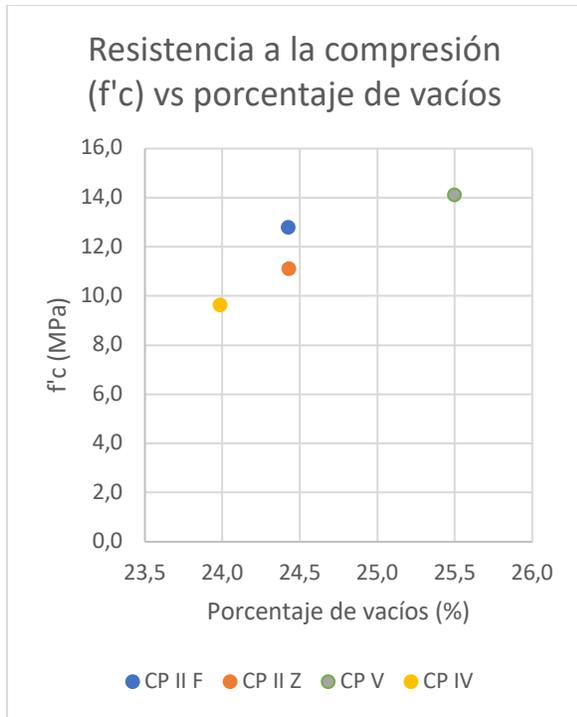


Figura 43: Comparación de la resistencia al esfuerzo de compresión a los 28 días (f'c) y el porcentaje de vacíos en cada concreto.

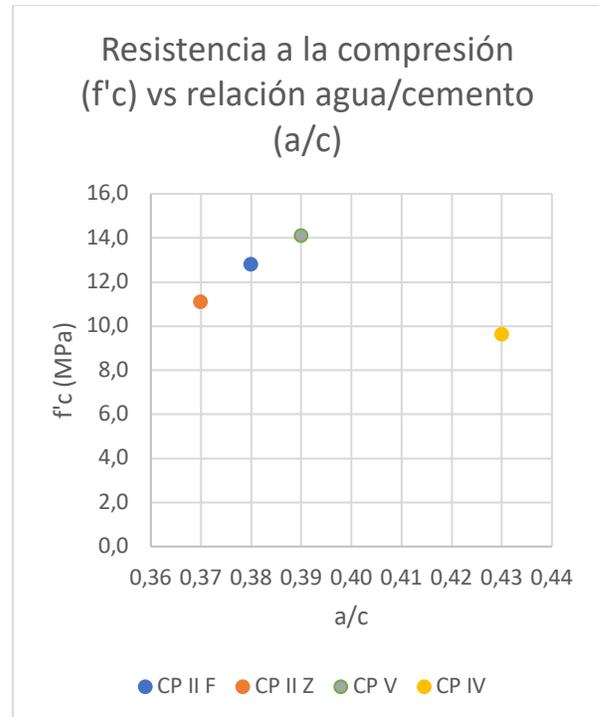


Figura 45: Comparación de la resistencia al esfuerzo de compresión a los 28 días (f'c) y la relación agua/cemento (a/c) de cada concreto.

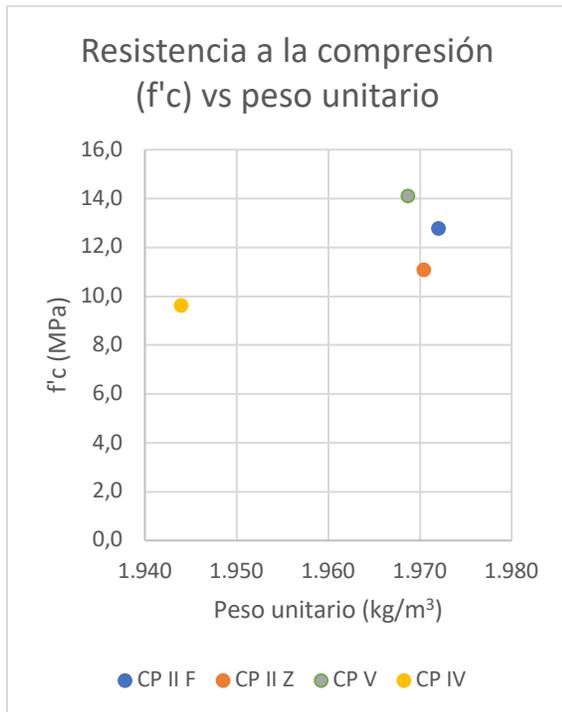


Figura 44: Comparación de la resistencia al esfuerzo de compresión a los 28 días (f'c) y el peso unitario real de cada concreto.

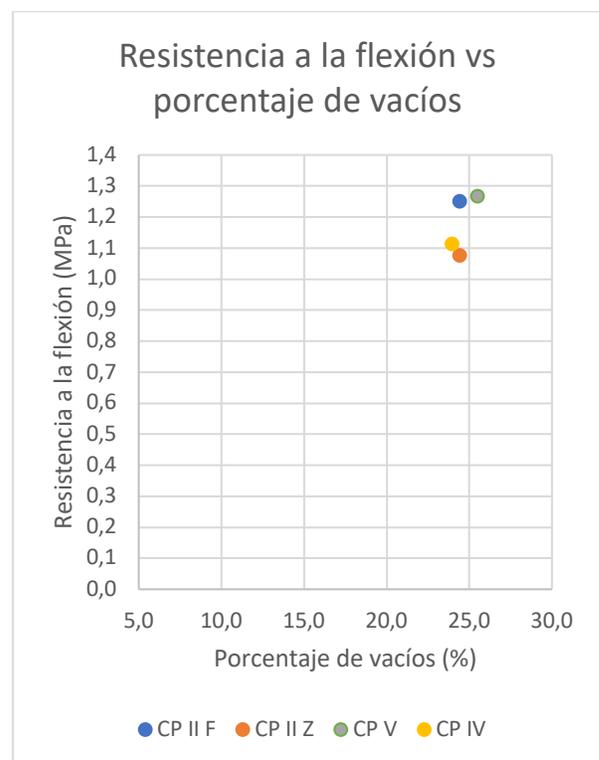


Figura 46: Comparación de la resistencia al esfuerzo de flexión a los 28 días y el porcentaje de vacíos en cada concreto.

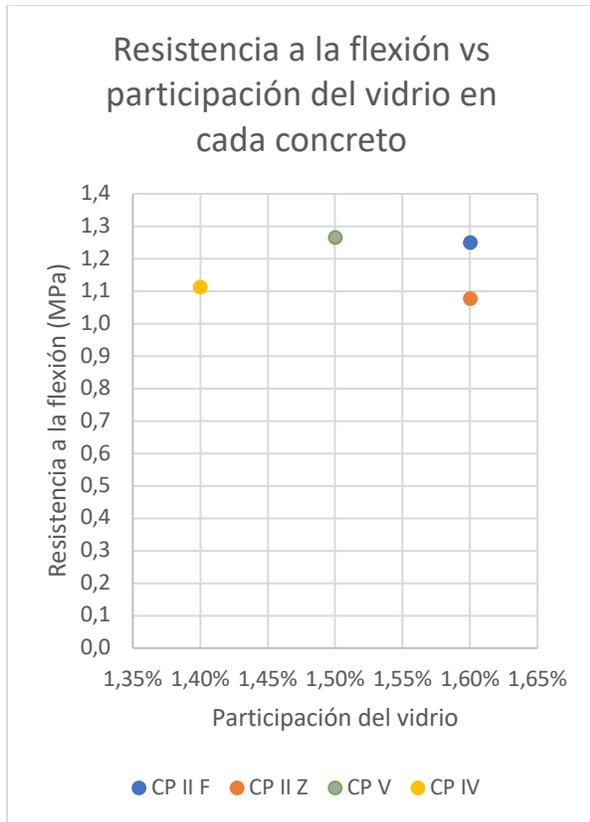


Figura 47: Comparación de la resistencia al esfuerzo de flexión a los 28 días y la participación del vidrio en cada concreto.

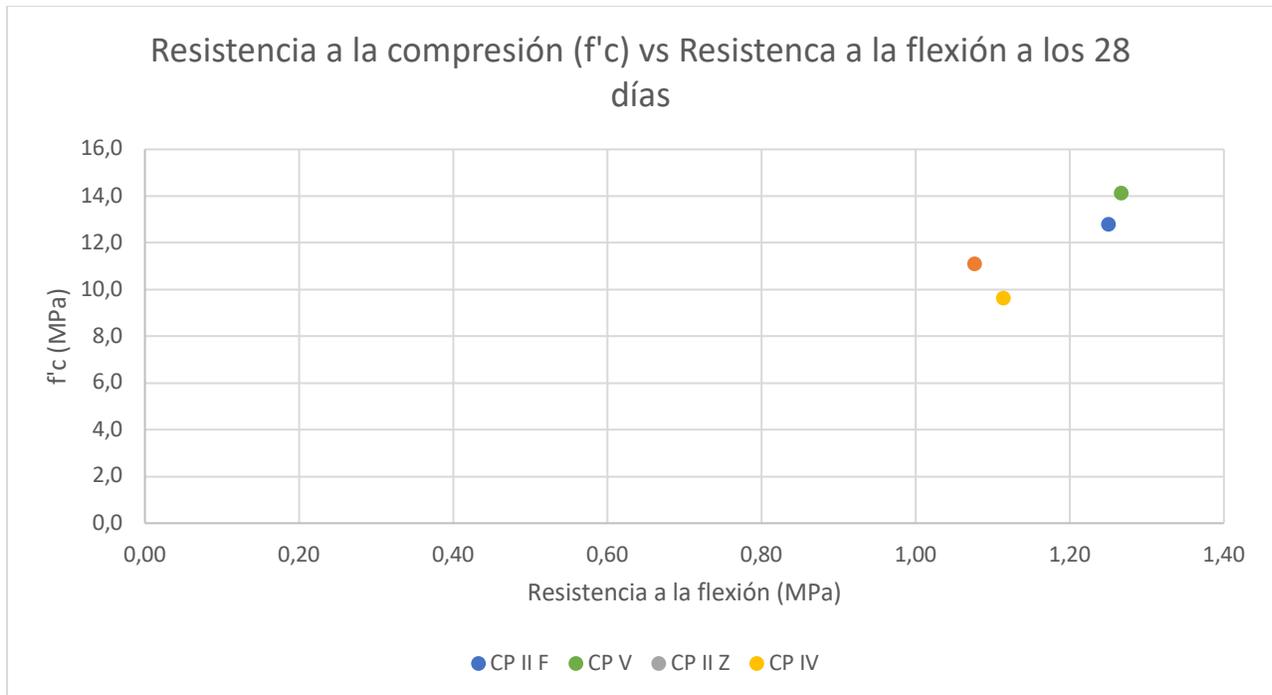


Figura 48: Comparación de la resistencia al esfuerzo de flexión a los 28 días (f'_c) y la participación del vidrio en cada concreto.

Ensayo de permeabilidad

Esta sección presenta los resultados del coeficiente de permeabilidad obtenidos según el procedimiento de la norma ABNT NBR 16416-15, así como un gráfico de tipo caja donde se representa el comportamiento de los resultados de cada uno de los tipos de concreto en estudio,

además de dos gráficos de dispersión muestran el comportamiento del coeficiente de permeabilidad promedio de cada tipo de concreto con respecto del porcentaje de vacíos y la resistencia a la compresión a los 28 días de edad ($f'c$).

TABLA 41. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE PLACAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II F Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Espécimen	Tiempo prueba premojado (s)	Cantidad de agua (kg)	Tiempo de duración (s)	Permeabilidad (mm/h)	Prom. Permeabilidad (mm/h)	Desv. Est. (mm/h)
1	< 30	18	19	48249,1	35991,7	12904,8
2	< 30	18	20	45836,7		
3	< 30	18	40	22918,3		
4	< 30	18	34	26962,7		

TABLA 42. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE PLACAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP V Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Espécimen	Tiempo prueba premojado (s)	Cantidad de agua (kg)	Tiempo de duración (s)	Permeabilidad (mm/h)	Prom. Permeabilidad (mm/h)	Desv. Est. (mm/h)
1	< 30	18	27	33953,1	30025,9	6293,3
2	< 30	18	26	35259,0		
3	< 30	18	31	29572,0		
4	< 30	18	43	21319,4		

TABLA 43. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE PLACAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II Z Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Espécimen	Tiempo prueba premojado (s)	Cantidad de agua (kg)	Tiempo de duración (s)	Permeabilidad (mm/h)	Prom. Permeabilidad (mm/h)	Desv. Est. (mm/h)
1	< 30	18	21	43654,0	34434,2	6426,6
2	< 30	18	27	33953,1		
3	< 30	18	30	30557,8		
4	< 30	18	31	29572,0		

TABLA 44. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE PLACAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP IV Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO

Espécimen	Tiempo prueba premojado (s)	Cantidad de agua (kg)	Tiempo de duración (s)	Permeabilidad (mm/h)	Prom. Permeabilidad (mm/h)	Desv. Est. (mm/h)
1	< 30	18	27	33953,1	33632,3	3503,2
2	< 30	18	26	35259,0		
3	< 30	18	32	28647,9		
4	< 30	18	25	36669,3		

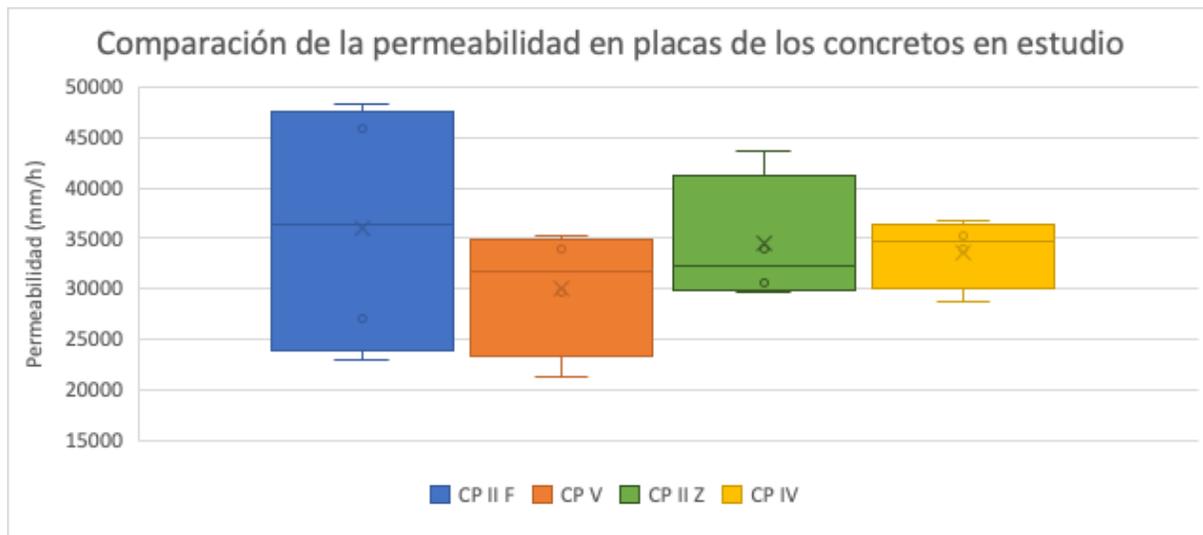


Figura 49: Comparación de la permeabilidad de los concretos en estudio

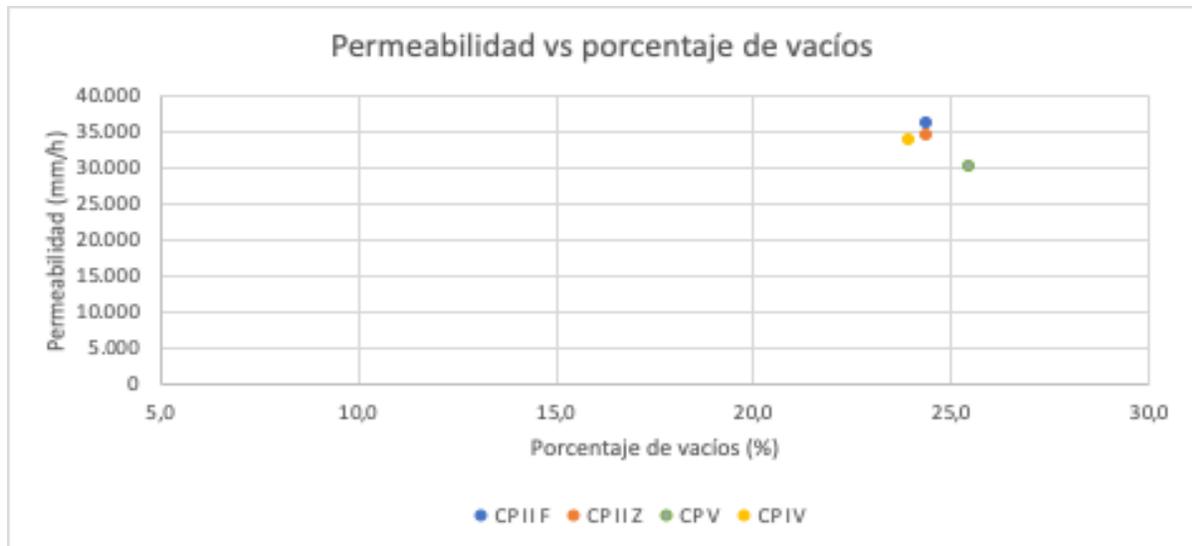


Figura 50: Comparación de la permeabilidad y el porcentaje de vacíos en cada concreto.

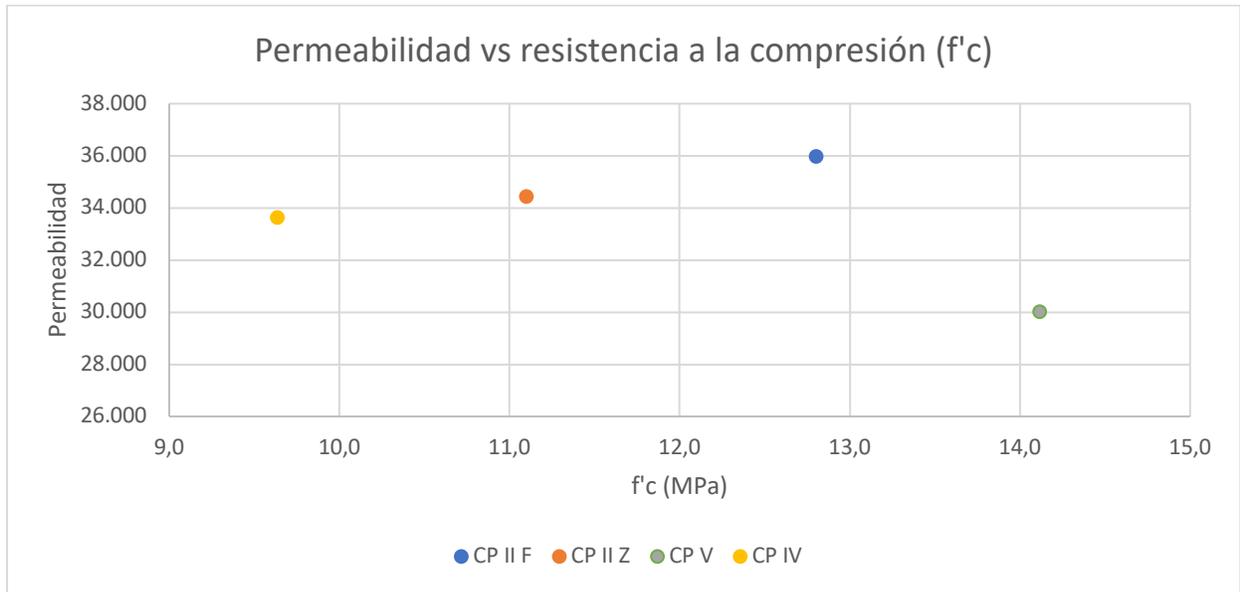


Figura 51: Comparación de la permeabilidad y el porcentaje de vacíos en cada concreto.

Pruebas Estadísticas

En las siguientes tablas se expone los resultados de las pruebas para obtener el coeficiente de correlación de Pearson relacionando los resultados de los gráficos de dispersión de los capítulos anteriores.

Cabe mencionar que los resultados correspondientes a las pruebas de Shapiro Wilk y ANOVA se presentan en la sección de "Apéndices". Estas pruebas estadísticas se realizaron con los resultados obtenidos de los

ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y permeabilidad.

Debido al comportamiento de los datos mostrados en las figuras 39 y 40, se decide realizar la prueba ANOVA a los resultados de concretos más próximos para verificar la similitud de las medias de ellos individualmente.

Coeficiente de correlación de Pearson

TABLA 45. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (f'c) Y PARTICIPACIÓN DE CEMENTO EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.						
Cemento	f'c (MPa)	Participación cemento (%)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coeficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	12,8	14,1%	0,00496	0,0047	1,70	0,617
CP II Z	11,1	14,2%				
CP V	14,1	13,9%				
CP IV	9,6	13,0%				

TABLA 46. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS ($f'c$) Y PARTICIPACIÓN DE VIDRIO EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	$f'c$ (MPa)	Participación vidrio (%)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	12,8	1,6%	0,000589	0,00083	1,70	0,419
CP II Z	11,1	1,6%				
CP V	14,1	1,5%				
CP IV	9,6	1,4%				

TABLA 47. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS ($f'c$) Y PORCENTAJE DE VACÍOS EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	$f'c$ (MPa)	Porcentaje de vacíos (%)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	12,8	24,42	0,84	0,56	1,70	0,889
CP II Z	11,1	24,43				
CP V	14,1	25,50				
CP IV	9,6	23,98				

TABLA 48. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS ($f'c$) Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO (a/c) EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	$f'c$ (MPa)	a/c	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	12,8	0,38	-0,021	0,023	1,70	-0,542
CP II Z	11,1	0,37				
CP V	14,1	0,39				
CP IV	9,6	0,43				

TABLA 49. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS ($f'c$) Y PESO UNITARIO EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	$f'c$ (MPa)	Peso unitario (kg/m ³)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	12,8	1972,0	14,49	11,51	1,70	0,742
CP II Z	11,1	1970,4				
CP V	14,1	1968,6				
CP IV	9,6	1943,9				

TABLA 50. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN A LOS 28 DÍAS Y PORCENTAJE DE VACÍOS EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	Resistencia a la flexión (MPa)	Porcentaje de vacíos (%)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	1,25	24,42	0,031	0,558	0,083	0,670
CP II Z	1,08	24,43				
CP V	1,27	25,50				
CP IV	1,11	23,98				

TABLA 51. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN A LOS 28 DÍAS Y PARTICIPACIÓN DE VIDRIO EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	Resistencia a la flexión (MPa)	Participación vidrio (%)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	1,25	1,6%	9,14E-06	0,000829	0,083	0,133
CP II Z	1,08	1,6%				
CP V	1,27	1,5%				
CP IV	1,11	1,4%				

TABLA 52. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (f'_c) Y FLEXIÓN A LOS 28 DÍAS EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	f'_c (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	12,8	1,25	0,122	0,083	1,70	0,870
CP II Z	11,1	1,08				
CP V	14,1	1,27				
CP IV	9,6	1,11				

TABLA 53. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA PERMEABILIDAD Y PORCENTAJE DE VACÍOS EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	Permeabilidad (mm/h)	Porcentaje de vacíos (%)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	35991,7	24,42	-949,35	0,56	2188,99	-0,778
CP II Z	34434,2	24,43				
CP V	30025,9	25,50				
CP IV	33632,3	23,98				

TABLA 54. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA PERMEABILIDAD Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (f'_c) EN CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO.

Cemento	Permeabilidad (mm/h)	f'_c (MPa)	Covarianza (σ_{xy})	Desviación X (σ_x)	Desviación Y (σ_y)	Coefficiente Correlación Pearson (r)
CP II F	35991,7	12,8	-1626,70	1,70	2188,99	-0,438
CP II Z	34434,2	11,1				
CP V	30025,9	14,1				
CP IV	33632,3	9,6				

Análisis de los resultados

En este capítulo se analiza los resultados obtenidos al seguir el procedimiento descrito en la metodología. Se trata los resultados de los procesos de caracterización de materiales, del diseño de mezcla obtenido con el método de Nguyen, D. H. (2014) y las pruebas o ensayos a los cuales se sometió cada uno de los concretos realizados.

Caracterización de los materiales

El vidrio molido utilizado se caracteriza por ser tratado para obtener un tamaño particular de 75 μm , en la figura 12 se muestra la diferencia de consistencia entre el material retenido y el pasante del tamiz 0,075 mm (#200), en donde en la sección (a) de dicha figura se muestra el material de mayor tamaño de partícula con una consistencia similar a una arena muy fina, mientras el material pasante de la sección (b) se muestra con una consistencia más fina similar a la del cemento. Además, a la hora de tamizar el material molido, el vidrio retenido en el tamiz 0,075 mm (#200) presentó un color más oscuro, debido a los desechos plásticos y demás componentes no vítreos los cuales no se logró eliminar al realizar la limpieza de los envases utilizados, el no usar este material retenido implica que el vidrio utilizado posee menor cantidad de basura respecto del desechado.

Para los agregados pétreos (arena y piedra) utilizados en la elaboración del concreto, tanto grueso como fino, tal como se muestra en las tablas 10 y 11, se obtuvo un módulo de finura de 6,01 y 1,97 para el agregado grueso y fino respectivamente, con lo cual se puede definir el agregado fino utilizado como una arena fina según la Tabla 1, y utilizando el Anexo 2 con los porcentajes mostrados en la granulometría del agregado grueso se denomina como un 7.

Los resultados de las tablas 10 y 11 demuestran que la sumatoria de masas retenidas en cada uno de los tamices y en el fondo del conjunto, en comparación a la masa inicial del ensayo no difiere. Según la norma NM 248 se permite hasta un 0,3% de diferencia.

La metodología de diseño de mezcla de Nguyen requiere tomar en cuenta la masa específica de los agregados y de cada cemento, siguiendo con los procedimientos estipulados por las normas correspondientes se obtiene los resultados mostrados en las tablas 12, 13 y 15, donde se muestra que entre los agregados, el fino posee una masa específica menor al grueso, entre los cementos, el cemento tipo CP II F posee la mayor masa específica con un valor de 3,02 g/cm^3 , mientras el de menor valor corresponde al CP IV con 2,83 g/cm^3 .

La metodología también requiere el porcentaje de absorción de los agregados, tal como se muestra en la tabla 14, el agregado fino posee una absorción de 4,35%, mientras el agregado grueso utilizado un 0,14%, estos porcentajes se utilizan para obtener la cantidad de agua requerida, así como el agua de saturación que se coloca a la hora de realizar la mezcla de concreto. Estos valores de absorción mencionados se consideran en el cálculo del agua total requerida, por lo tanto, si se utilizan agregados con un porcentaje de absorción mayor, entonces se requiere utilizar una cantidad de agua mayor.

Diseño de mezcla con método de Nguyen

Al seguir el procedimiento propuesto por Nguyen, D. H. (2014) con el fin obtener una dosificación para concreto permeable tal como se presenta en las tablas 16 y 17, utilizando las características definidas de los materiales, se obtiene el volumen

de agregados y pasta de concreto que se utilizarían para 1 m³ de concreto, siendo estos 0,575 m³ y 0,2241 m³ respectivamente. Tal como se menciona en la metodología, para obtener la relación agua cemento óptima para cada tipo de cemento por utilizar, se realiza la prueba de drenaje, donde primeramente se obtuvo el diámetro promedio de los agregados en conjunto, al utilizar las características granulométricas de los agregados en mención se obtiene un diámetro promedio de 3,19 mm, por lo tanto, se decide utilizar el tamiz con abertura menor más cercana, así se utiliza el tamiz de apertura de 2,36 mm (#8).

Al realizar la prueba de drenaje se obtiene los resultados de relación a/c de la tabla 19. Estas relaciones a/c son relativamente altas en comparación a las requeridas usualmente en el concreto permeable sin sustituciones, las cuales corresponden a valores entre 0,27 y 0,30 según National Concrete Pavement Technology Center (2006). Esto se debe a la adición del vidrio molido, se indica así que este material posee una mayor demanda de agua para obtener su hidratación, además, aumenta la cantidad de agua requerida para obtener una consistencia del concreto adecuada. Cabe recalcar que el cemento CP IV obtuvo la relación a/c más alta siendo esta 0,43, aproximadamente 13% más alta que los demás cementos en estudio, lo cual indica que dicho cemento absorbe más agua que los demás y requiere menor cantidad de cemento para obtener su consistencia deseada.

Con respecto de los resultados de la tabla 20, gracias al espesor de la pasta de cemento que cubre los agregados (0,28 mm según los datos teóricos calculados en la tabla 20) y el grado de hidratación, se obtiene la porosidad total que posee la mezcla. Para discutir sobre este resultado se debe aclarar la diferencia entre la porosidad total y el volumen de vacíos, en donde, el volumen de vacíos corresponde al valor teórico del volumen de los poros formados entre las esferas de agregado con pasta, mientras la porosidad total corresponde al valor teórico todos los vacíos encontrados en la mezcla, o sea, tomando en cuenta los espacios no permeables. De esta manera se indica que al obtener una porosidad total "P_t" de aproximadamente 28% en cada tipo de concreto, tal como se muestra en la tabla 20 y comparada con el volumen de vacíos establecido anteriormente, se obtiene: los vacíos no accesibles por el agua corresponden a un 29% del total de vacíos.

Una vez finalizado el proceso de la obtención de dosificación para cada uno de los concretos, se obtiene los resultados de la tabla 21, los cuales muestran las cantidades de materiales que se deben utilizar para 1 m³ de concreto. Tal como se menciona anteriormente, el concreto que utiliza CP IV requiere la menor cantidad de cemento en comparación con los demás concretos en estudio, siendo incluso aproximadamente un 10% menor respecto de los concretos con CP II F y CP II Z, este valor es de utilidad para los usuarios quienes desean realizar grandes cantidades de concreto, pues de esta manera pueden tomar en cuenta los aspectos económicos de cada tipo de concreto estudiado. La tabla 21 también muestra que, tal como se esperaba dados los resultados de relación a/c, el cemento CP IV requiere de mayor cantidad de agua para obtener la misma consistencia que los demás, además, así como la utilización del vidrio es directamente proporcional al cemento, al requerir menor cantidad de cemento de igual manera requerirá menor cantidad de vidrio molido.

Utilizando la masa total de cada uno de los concretos y tomando en cuenta que corresponden a un volumen de 1 m³, se obtienen las masas específicas de la tabla 24, en donde se muestra: el concreto con cemento CP IV posee la menor masa específica, mientras el CP II F posee la mayor, por lo tanto se considera el concreto más liviano es el CP II F, esto, pues tal como se mencionó, el concreto con CP II F es el cual precisa menor cantidad de cemento y como se indicó en la tabla 15, los 4 cementos poseen un promedio de masa específica de 2,94 g/cm³ y el agua cuenta con una masa específica de aproximadamente 1 g/cm³, así, el concreto con CP II F al requerir de menos cantidad de cemento y más de agua, y al ser el agua más liviana respecto del cemento, se cataloga este concreto como el más liviano.

Por otro lado, tomando en cuenta los valores de masa específica de cada concreto de la tabla 24 y el volumen de los moldes por utilizar, se obtiene, tal como se muestra en las tablas 22 y 23, la masa correspondiente a los moldes para cada tipo de concreto. Con estos datos se logra planificar la cantidad total de concreto por realizar por tanda y de igual manera haciendo uso de la tabla 21, la cantidad correspondiente a cada material del concreto.

Prueba de asentamiento, índice de vacíos y masa específica

A la hora de finalizar la elaboración de cada mezcla de concreto, se ejecutó la prueba de asentamiento tal como lo dicta la norma ABNT NM 67-98, se hace uso de esta prueba con el fin de obtener un resultado binario respecto de la consistencia del concreto, o sea, si posee una buena o mala consistencia. Se toma como buena consistencia en la cual no se presenten cambios de tamaño, forma y deslizamientos del material durante la prueba mencionada.

Si bien es conocido, el concreto permeable suele presentar un asentamiento considerablemente nulo, sin embargo, esto de igual manera transmite información, el concreto posee una consistencia cohesiva. Con la ejecución de dicho ensayo no se busca obtener un resultado numérico como lo sería si fuese aplicado a concreto hidráulico convencional, de manera alterna se busca conocer si el concreto presentó caída o no, tal como se muestra en la tabla 28. El resultado de esta prueba es de 20 y 25 mm para los concretos, siendo este un valor considerablemente nulo, ello indica que cada uno de los concretos posee una buena cohesión de mezcla. Al obtener una cohesión buena en el concreto, se evita haya un exceso de pasta o una pasta sumamente líquida, lo cual provocaría esta se segregue, disminuyendo así los vacíos del concreto, afectado la permeabilidad.

Más adelante, una vez pasado el proceso de moldeo, desmolde y curado de los especímenes de prueba de cada tipo de concreto, se realiza la prueba de obtención de índice de vacíos y masa específica para el concreto en estado endurecido, siguiendo con el proceso descrito en la sección de metodología, de esta manera se obtiene los resultados de la tabla 30. Se considera estos resultados son los obtenidos experimentalmente, se compararon con los establecidos teóricamente en las tablas 31 y 32, donde, con respecto de la masa específica, se obtuvieron porcentajes de variación sumamente bajos, estos están por debajo del 2% de diferencia, lo anterior indica que el procedimiento resultante a partir de la masa específica teórica es sumamente certero con el mantenimiento de los valores definidos.

El ensayo para obtener el índice de vacíos según ASTM C1754-12, entrega un resultado el cual considera la porosidad total del espécimen, o sea, incluye la porosidad de la pasta y demás poros, por lo tanto, es comparada con la porosidad total teórica obtenida mediante la metodología de Nguyen. Se obtiene así, tal como se muestra en la tabla 32 para cada tipo de concreto realizado, diferencias de entre aproximadamente un 15% y 20%, esta diferencia es causada debido a que el proceso estipulado en la norma y el realizado difirió en cuanto en la práctica se utilizaron los cilindros de concreto con coronamiento, esto causa una varianza significativa en el índice de vacíos.

Ensayos mecánicos

En las tablas 33, 34, 35 y 36 se presenta los resultados del ensayo de resistencia a la compresión para cilindros de cada uno de los concretos, cada uno de estos evaluado a las edades desde su elaboración de 7, 14 y 28 días, además se tienen los promedios para cada grupo de muestras del mismo tipo y su respectiva desviación estándar. El promedio de los resultados de estas tablas se plasman en las figuras 35, 36, 37 y 38, donde se muestra el comportamiento de cada uno de los concretos al ser sometidos a una fuerza de compresión axial a diferentes edades.

Al tomar en cuenta que no se poseen investigaciones las cuales estudien los concretos realizados con sus características de porcentaje de sustitución y tamaño de partícula de vidrio correspondientes, por lo tanto, no se tiene un control exacto del comportamiento que debería cumplir su resistencia a la compresión, sin embargo, al ser comparado con el comportamiento del cemento hidráulico Portland, el cual según indica Cuevas Kauffmann, R. L. (2017), a los 7 días de elaborar el concreto hidráulico, este alcanza aproximadamente un 70% de su resistencia a los 28 días ($f'c$), según los resultados, el concreto con cemento CP II F obtuvo una resistencia a los 7 días de 9,4 MPa. Esto significa un 73% de la obtenida a los 28 días, por dicha causa se muestra la curva plasmada en la figura 35, la cual tiene un comportamiento considerablemente normal, sin embargo, las curvas de los demás concretos presentan formas diferentes a esta, lo cual se debe a que a los 7 días el concreto con cemento CP V obtuvo un 84%, el

CP II Z un 96% y el CP IV un 88% de su f_c , se indica así que dichos cementos con sustitución poseen una mayor resistencia a edades tempranas, destaca el CP II Z. Cabe mencionar que la resistencia obtenida a los 14 días fue de un 95%, 91%, 98% y 91% para los concretos con cemento CP II F, CP V, CP II Z y CP IV respectivamente. Ello indica: entre los 14 y 28 días estos concretos logran aumentar su resistencia únicamente entre 2% y 9%.

Tomando en cuenta que actualmente no se posee parámetros de aceptación de desviaciones estándar para concretos permeables, se utiliza como referencia lo indicado en ACI 214R-11 para concretos hidráulicos convencionales, expuesto en el Anexo 3, en donde, según los resultados de desviación estándar del f_c mostrados en las tablas 33, 34, 35 y 36, los datos poseen un control "excelente" y "muy bueno", oscila entre valores menores a 1,4 y 1,7, según el Anexo 3. Esto indica, según la norma indicada, los resultados de cada familia de concretos son poco dispersos, obteniendo un alto grado de precisión en cada concreto en estudio.

Se debe recalcar, según indicó Bernardo, A. (3 de marzo de 2020), los parámetros de aceptación del concreto hidráulico convencional son diferentes a los del concreto permeable, pues este último posee un comportamiento diferente en su desempeño mecánico, posee resultados más heterogéneos en sus muestras, por lo tanto, considerar los parámetros de aceptación indicados para el concreto hidráulico convencional es una manera más crítica de evaluar los resultados de concreto permeable.

Tal como parte del objetivo de este estudio, la figura 39 permite hacer una comparación de la curva de comportamiento de la resistencia a la compresión para cada tipo de concreto, en donde se denota claramente la diferencia entre los resultados. Gracias a esta figura se puede señalar que el concreto con CP V obtuvo el mejor desempeño de resistencia a la compresión, mientras el de CP IV fue el menor resultado, obtiene incluso menor resistencia a los 28 días, que el valor de resistencia a los 7 días del CP V y CP II F. Se debe recordar, como anteriormente se menciona, que el concreto con CP IV fue el concreto en el cual se utilizó menor cantidad de cemento en su pasta, por lo tanto, cuenta con una menor capacidad aglutinante, siendo un factor capaz de afectar su resistencia f_c . Sin embargo, según se indica, al

poseer menor cantidad de cemento cuenta con un menor costo de producción respecto de los demás.

Cabe recalcar que la figura 39 muestra gráficamente el comportamiento de los resultados obtenido y aunque se denote gráficamente la diferencia entre ellos, debe realizarse un análisis estadístico de los resultados para así conocer si esta diferencia es estadísticamente significativa, este análisis estadístico se muestra en la sección correspondiente a los análisis estadísticos realizados.

Más adelante se encuentran las tablas 37, 38, 39 y 40, las cuales presentan los resultados de las pruebas de resistencia a la flexión en prismas de cada uno de los concretos a los 28 días de edad, además se tiene los promedios para cada grupo de muestras del mismo tipo y su respectiva desviación estándar. Dicho valor de varianza es sumamente bajo, representa coeficientes de variación igual y menores a un 5,6%. Lo cual indica que los resultados presentan una distribución homogénea entre cada tipo de concreto y su promedio es considerablemente representativo a los datos totales obtenidos.

Se debe considerar lo siguiente: se realizó un corte de los especímenes de prueba en forma de placa para obtener las vigas, este corte en el concreto ocasiona una pérdida en la resistencia obtenida, implicando así una pérdida de confiabilidad en el resultado de la resistencia a la flexión de todos los cuerpos.

Los resultados de los esfuerzos máximos de flexión obtenidos se plasman en el gráfico de caja de la figura 40, en donde, no solo se muestra la distribución de los datos, si no su dispersión. Se tiene que, según el diagrama, el concreto con CP V presenta la mayor amplitud, ello permite interpretar que sus datos son los más dispersos entre los 4 tipos, lo cual se confirma al comprobar que su desviación estándar es la mayor. Mientras, aunque visualmente el menor rango de dispersión corresponde al CP II Z, en las tablas 37, 38, 39 y 40 se puede observar es similar al de CP II F. Cabe recalcar que los rangos intercuantiles de los gráficos, o sea, la amplitud de las cajas es sumamente similar, da a entender que la variabilidad del 50% de los datos es similar entre los concretos en estudio. La colocación de la mediana de cada caja indica qué tan simétrica o asimétrica es la distribución de los datos, en donde, para los concretos con CP II F y CP V se presenta una distribución sumamente asimétrica, muestra la mediana se encuentra más cercana al

borde inferior de la caja, por lo tanto, los datos mayores a la mediana se encuentran más separados y está sesgado positivamente. El concreto con CP II Z de igual manera muestra distribución asimétrica, sin embargo los datos menores, en este caso se encuentran más separados, siendo sesgado negativamente, mientras el concreto con CP IV presenta una distribución realmente simétrica, por lo tanto, se puede decir que su media es igual a su mediana y moda.

A la hora de hacer la comparación entre las cajas de los concretos en estudio se identifica: el concreto el cual obtuvo un mayor valor del promedio de resistencias a la flexión corresponde al de CP V, no muy alejado del CP II F, el concreto con CP V no solo logra el promedio mayor, sino también sus datos máximos y mínimos son los mayores obtenidos entre los concretos, incluso se observa que el valor mínimo de los concretos con CP V y CP II F es mayor a los valores máximos obtenidos por los otros concretos. Las cajas de los concretos con CP V y CP II F poseen una media similar, sin embargo, tal como se muestra sobre la media del CP V, la amplitud de distribución de datos es mayor respecto de la del CP II F, esto significa que el resultado de ella puede estar sesgado positivamente, Para esclarecer esta suposición deben realizarse más cuerpos de prueba para lograr un muestreo mayor y comprobar la precisión de los resultados.

Por otro lado, se muestra: el concreto con menor resultado de esfuerzo a la flexión corresponde al CP II Z, este tiene la mejor distribución de datos, pero los menores resultados de resistencia.

En la figura 41 se muestra la distribución de los resultados de resistencia a la compresión con respecto de la participación que posee el cemento en cada uno de los concretos, en este se muestra coincide el hecho de presentar una menor resistencia a la compresión en el concreto que posee menor cantidad significativa de cemento tal como se menciona anteriormente. Sin embargo, los otros tres concretos poseen un porcentaje de participación de cemento similar y una f_c relativamente similar, pero, al compararlos detalladamente, entre ellos el CP V posee menor cantidad de porcentaje de cemento y la mayor f_c , indicando que la mezcla aglutinante de cemento y vidrio en este, produce mejores resultados con respecto de la compresión. Eso se demuestra nuevamente en la figura 42, donde de nuevo el

concreto con CP IV posee la menor participación de vidrio molido y la menor f_c , y de igual manera, para los restantes, el CP V posee menor cantidad de porcentaje de vidrio en su mezcla y la mayor f_c . Las relaciones de las figuras 41 y 42 son similares, pues al utilizar el mismo porcentaje de sustitución del cemento por vidrio, se ligan directamente uno con el otro, por lo tanto, si se requiere más cemento se requerirá más vidrio y de igual manera a la inverso.

La figura 43 contradice los resultados que se espera, según indica el AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) (2010), entre mayor sea el porcentaje de vacíos, menor será la f_c , sin embargo, se debe notar que la escala horizontal del gráfico mostrado comienza en 23,5% y se muestra hasta 26%, siendo un rango relativamente pequeño de visualización de estos resultados, pues los concretos fueron elaborados con base en el mismo porcentaje de vacíos teórico (proceso mostrado en la sección de Metodología), los concretos poseen un resultado similar de porcentaje de vacíos real, correspondiendo a una diferencia máxima de un 10,6% de los resultados entre los diferentes concretos. De igual manera, cabe recalcar que, se debe de poner en duda la confiabilidad de los resultados mostrados en esta figura ya que, como se menciona anteriormente, los resultados de porcentaje de vacíos obtenidos se diferencian de los teóricos en hasta un 20%, esta es una diferencia no aceptable según la norma ASTM C1754-12.

Tal como se indica, la relación a/c utilizada en los concretos fue obtenida gracias a la prueba de drenaje del método de dosificación de Nguyen, ella busca determinar la cantidad suficiente de pasta para cubrir los agregados, de esta manera se buscó la relación a/c para cada concreto de forma que todos obtuvieran la misma consistencia buscada en el método. La figura 45 muestra lo siguiente: el concreto con CP IV posee una mayor relación a/c y según se menciona, obtuvo la menor f_c . Sin embargo, se debe mencionar que cada concreto utilizó un cemento diferente, cada uno posee una reacción y características distintas a los demás, por lo tanto, una comparación entre una única relación a/c independiente entre diferentes cementos no permite relacionar un aumento o disminución de la f_c debido a una a/c mayor o menor respecto de las demás utilizadas, sino, dicha diferencia de f_c se debe a la diferencia de las reacciones químicas que ocurren en el proceso de hidratación en cada tipo de cemento.

Al igual que se mencionó para la figura 43, el eje horizontal de la figura 44 representa un pequeño rango de valores para así mostrar de mejor manera el comportamiento minucioso entre los resultados mostrados, o sea, los valores de peso unitario entre los diferentes concretos son relativamente similares. Sin embargo, se denota la diferencia que posee el concreto con CP IV con los demás, el cual tiene el menor peso unitario, pero de igual manera la menor f_c . Los demás resultados de peso unitario son sumamente similares, muestran las diferencias de f_c mencionadas.

La figura 46 muestra de manera más visual la similitud de resultados obtenidos con respecto del porcentaje de vacíos, los cuales al estar en perspectiva con la resistencia a la flexión denotan una tendencia a similitud en el comportamiento de resistencia a la flexión cuando se diseña y se obtiene una cantidad de vacíos igual o similar a la hora de sustituir cementos utilizados con 10% de vidrio.

A la hora de comparar los resultados expuestos en las figuras 42 y 47 se obtiene una notable similitud del comportamiento de ambos ensayos mecánicos ante el porcentaje de participación del vidrio en el concreto, donde el concreto con CP IV posee la menor participación de vidrio y una de las menores resistencias a la flexión, y según las tablas 37, 38, 39 y 40, supera al CP II Z por 0,03 MPa. Mientras al CP V le corresponde el mayor valor de resistencia al ser el segundo concreto con menor participación de vidrio en su composición.

Al comparar ambas pruebas de desempeño mecánico realizadas en la figura 48 se consigue observar: en efecto, el concreto con CP V posee el mejor desempeño mecánico, sin embargo no difiere mucho del concreto con CP II Z, el concreto con CP IV posee la menor f_c y una de las menores resistencias a la flexión, y en caso contrario, el concreto con CP II posee la menor resistencia a la flexión y una de las menores f_c .

Además, al tomar en cuenta lo indicado por la norma ABNT NBR 16146-15 mostrado en la tabla 5 de la sección de "Marco Teórico", las resistencias a la compresión obtenidas no consiguen cumplir con la resistencia indicada para la utilidad del concreto en aceras o calles de tráfico leve. Sin embargo, tomando en cuenta que la resistencia a la flexión requerida para un uso en aceras es de 1,0 MPa según ABNT NBR 16146-

15, todos los resultados cumplen con este valor mínimo.

Ensayo de permeabilidad

Los resultados obtenidos al ejecutar la prueba de permeabilidad con un flujo constante de la norma ABNT NBR 16146-15 se muestran en las tablas 41, 42, 43 y 44 para cada uno de los concretos en estudio. En donde, en primer lugar, se muestra que la totalidad de los pre-ensayos realizados indicaron se debió de utilizar una cantidad de 18 kg para el ensayo.

Tal como se expone en la sección de Marco Teórico, para considerar que las pruebas de permeabilidad realizadas poseen valores aceptables y un promedio el cual represente las muestras, cada una de las pruebas realizadas para cada tipo de concreto no debe superar una diferencia del 30% del promedio. Al observar los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad para cada tipo de concreto se obtiene, únicamente el concreto con CP II F no cumple lo mencionado, o sea, la totalidad de sus resultados no poseen una diferencia menor a 30% de su promedio, por lo tanto, los datos de permeabilidad obtenidos para este concreto no se consideran confiables. De manera contraria, los datos del coeficiente de permeabilidad de cada uno de los tipos de concreto poseen una diferencia menor a 30% con respecto de su respectivo promedio, eso indica sus datos significativamente confiables para trabajar.

Los valores promedio de los resultados de permeabilidad de los tipos de concreto son sumamente similares, tal como se muestra en la figura 49, las medias de las cajas tienden a ser similares y si se toman en cuenta la dimensión del eje vertical, los valores obtenidos no difieren en gran escala unos de los otros. Indican así, existe una precisión de permeabilidad en la elaboración del concreto y su resultado. Se debe recalcar que el concreto con CP II F posee la distribución más separada de los tipos evaluados, la caja de datos se observa cerca del doble de tamaño de las demás, lo cual se comprueba en las tablas 41, 42, 43 y 44, donde se observa el valor de la desviación estándar de dicho concreto es cercano al doble del valor de los concretos con CP V y CP II Z. El concreto con CP IV posee la caja con menor

tamaño. Ello indica que los valores de este poseen una distribución menor respecto de los demás.

Tal como se menciona, los resultados del coeficiente de permeabilidad son relativamente similares, lo cual puede notarse de mejor manera en la figura 50, donde al observar los valores a una escala mayor, se demuestra la similitud de resultados, alejándose en pequeña escala la permeabilidad del CP V, siendo esta la más baja, sin embargo posee la mayor cantidad de vacíos. Al analizar los resultados que se muestra en la figura 50, se consigue observar la tendencia de los concretos en estudio a mantener el porcentaje de vacíos y permeabilidad como valores constantes dadas las condiciones.

Si se deja a un lado el hecho de que los coeficientes de permeabilidad lograron valores similares, al observar el comportamiento de manera más detallada, tal como se muestra en la figura 51, se logra definir: el concreto con CP V obtuvo la mejor f_c , pero el coeficiente de permeabilidad más bajo, sin embargo, el concreto con CP II F presenta un mucho mejor comportamiento, tanto mecánico como permeable, es el concreto con mejor permeabilidad y la segunda mayor f_c . De manera contraria el concreto con CP IV obtuvo la segunda menor permeabilidad y la menor f_c .

Además, al hacer uso de la tabla 6 y los valores de coeficiente de permeabilidad percibidos, se consigue clasificar los concretos con un grado de permeabilidad alto.

Análisis estadístico

Al aplicar la prueba de Shapiro Wilk en cada uno de los grupos de datos correspondientes a los ensayos de resistencia a la compresión, flexión y ensayo de permeabilidad, según se muestra en el Apéndice 1, la distribución de todos los datos es normal, utiliza un nivel de significancia de 0,05. Esto indica que, para cada uno de los grupos de datos, menos del 5% de las observaciones se encuentran fuera de un rango donde se tiene de extremo positivo y negativo la desviación estándar de cada grupo, alrededor de su correspondiente media. O sea, el 95% de los datos de cada grupo es cercano a la media en un rango con el valor de la desviación estándar.

Además, el hecho de obtener que todos los grupos de datos son normalmente distribuidos,

permite realizar un análisis de varianza (ANOVA) entre ellos. El Apéndice 2 muestra los resultados de los ANOVA para cada uno de los ensayos mecánicos y permeables realizados en el concreto.

Según se menciona anteriormente, los resultados de resistencia a la compresión de acuerdo con cada una de las edades de los concretos mostrados en la figura 39 poseen un comportamiento similar, sin embargo, las tablas 1, 2 y 3 del APÉNDICE 2 indican que el ANOVA de los concretos a cada una de las edades obtiene un resultado negativo, o sea, al evaluar los cuatro concretos indica sus medias son diferentes, por lo tanto, las diferencias de los resultados de la figura 39 son significativas en un 95% de precisión. Sin embargo, por cuanto este análisis tomó en cuenta la totalidad de concretos en estudio, es necesario realizar el ANOVA dentro de los resultados más cercanos, pues se conoce hasta ahora que los cuatro concretos en conjunto poseen medias diferentes, no obstante, pueden existir medias similares entre cada uno de los concretos al compararlos individualmente con los demás. Las tablas 5, 6 y 7 del APÉNDICE 2 muestran estos resultados, los cuales confirman que la totalidad de las medias de la resistencia a los 28 días de todos los concretos en estudio son diferentes. Esto, además confirma lo señalado anteriormente, el concreto con CP V posee significativamente la mayor f_c , seguido del CP II F, luego el CP II Z y por último el CP IV.

Cómo se observa en la figura 40, la media de la resistencia a la flexión de los concretos con CP II F y CP V son similares según lo muestra dicha figura, al igual que las medias de los concretos con CP II Z y CP IV. Sin embargo, para confirmar estas sean significativamente similares se realiza un ANOVA entre ellas. La tabla 7 del Apéndice 2 indica que las medias de la resistencia a la flexión de los cuatro concretos en conjunto son diferentes, pero, al evaluar, ellas individualmente, en los pares mencionados se obtienen los resultados de las tablas 8 y 9 del Apéndice 2, en donde se denota que el valor de "F" del ANOVA es menor a su valor crítico, en el caso de la comparación de los concretos con CP II F y CP V de la tabla 8, se obtiene un "F" de aproximadamente 0,26 y su valor crítico corresponde a aproximadamente 4,96. De igual manera en la comparación de los concretos con CP II Z y CP IV de la tabla 9 indicada se obtiene un "F" de aproximadamente 1,31 relacionado con

el mismo valor crítico anterior. Los resultados de estas comparaciones confirman lo comentado, las medias de los concretos con CP II F y CP V son estadísticamente iguales, de la misma forma que las medias de los concretos con CP II Z y CP IV. Para descartar una similitud entre los resultados más próximos visualmente entre ambos pares mencionados, se realizó un ANOVA entre los concretos con CP II F y CP IV, sin embargo, tal como se presenta en la tabla 10 del APÉNDICE 2, las medias de estos son significativamente diferentes. Por lo tanto, se confirma con certeza: los concretos con mayor resistencia a la flexión corresponden a los que utilizaron CP II F y CP V y los menores CP II Z y CP IV, tienen una diferencia significativa entre ellos.

Tal como se menciona, la figura 49 muestra una gran similitud de la media de cada uno de los resultados de permeabilidad de los concretos, lo cual se confirma en la tabla 11 del APÉNDICE 2, pues afirma que las medias son iguales, por lo tanto, se asegura que todos los concretos obtuvieron estadísticamente una misma permeabilidad.

A la hora de obtener el cociente de correlación de Pearson para diferentes variables, se logra afirmar el comportamiento de las figuras 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50 y 51. La tabla 45 indica lo siguiente: el coeficiente de correlación de los datos de la figura 41 corresponde a 0,617, ello significa que los datos tienden a relacionarse de una manera proporcionalmente positiva. Sin embargo, al conocer que si el valor del coeficiente es 0 no existiría alguna relación lineal, y si el valor es 1 sería una relación lineal perfecta, al tener un valor cercano al punto medio entre estas dos condiciones, no se considera confiable afirmar que los datos tienden a la relación lineal positiva. Esto ocurre con los coeficientes de correlación para las variables de las figuras 42, 46 y 54, y de manera inversa, o sea, con correlaciones lineales negativas, para la figura 45 y 51.

Las variables de la figura 43 evaluadas en la tabla 47 indican que realmente tienden a ser relacionadas linealmente positivas, confirman lo indicado anteriormente. Según los concretos en estudio, el concreto con CP V y sustitución del 10%, al obtener el mayor valor de porcentaje de vacíos y f_c , indica este posee una mejor propiedad aglutinante respecto de los demás.

De igual manera que la figura 43, las variables de la figura 44 poseen un valor de coeficiente de correlación cercano a uno. En este

caso es 0,742, e indica existe una tendencia positiva lineal entre la f_c y el peso unitario, o sea, los concretos con mayor peso unitario tienden a obtener un mayor f_c , según los resultados producidos.

En el caso de las variables de la figura 47, estas obtienen un coeficiente de correlación de 0,133, este valor es relativamente cercano a 0, indica que los datos de las variables tienden a ser linealmente independientes, o sea, las mezclas de concreto que obtuvieron mayor participación de vidrio en su mezcla no obtendrán estrictamente una mayor resistencia a la flexión.

El resultado del coeficiente de correlación de la tabla 52, confirma: los valores de desempeño mecánico del concreto tienden a ser linealmente dependientes, poseen una tendencia en la cual, si se logra una alta resistencia a la flexión, se obtendrá una mayor f_c . Tal como se observa en la figura 48.

La tabla 53 indica: las variables mostradas en la figura 50 tienden a actuar de manera negativa lineal dependiente, o sea, los concretos con mayor porcentaje de vacíos, tienden a obtener una menor permeabilidad. Sin embargo, se debe recordar lo mencionado anteriormente, los resultados de permeabilidad del estudio presente son estadísticamente iguales, por lo tanto, se descarta categorizar estas variables como linealmente dependientes de manera positiva o negativa.

Comparación de resultados con otros concretos

Al tomar en cuenta que actualmente se realiza gran variedad de estudios con respecto de nuevas tecnologías en el concreto convencional y permeable, es necesario realizar una comparación entre las investigaciones realizadas por otros autores, de esta manera se logra ubicar los resultados del proyecto presente en el mundo de la investigación del concreto permeable.

Si se utiliza una serie de resultados de estudios de concreto permeable mostrados en el Apéndice 3, se logra comparar los resultados del desempeño mecánico y permeable, se toma en cuenta los parámetros de tipo de residuo incorporado en el concreto, la cantidad de residuo

utilizada, el tamaño máximo del agregado grueso, relación a/c utilizada y porcentaje de vacíos obtenido.

Los resultados presentes en la tabla mencionada pueden dividirse en tres tipos para una mejor comparación con el estudio actual. Los resultados se evalúan con base en concretos permeables con diferentes residuos, concretos permeables con utilización de vidrio reciclado y concretos permeables convencionales.

A la hora de comparar los resultados obtenidos con los concretos permeables con diferentes residuos del Apéndice 3, se denota los mejores resultados de resistencia a la compresión corresponden al concreto que utiliza residuos de obras civiles. Sin embargo, el estudio presente obtiene resultados similares, ubicándose entre los mejores resultados de resistencia a la compresión de los concretos permeables con diferentes residuos del Apéndice 3. Por otro lado, se denota que al utilizar un 75% de incorporación de corteza de palma se obtiene la resistencia a la compresión menor, según la investigación de IBRAHIM, H. A. & RAZAK, H. A. (2016). Con respecto de los resultados de resistencia a la flexión, al utilizar cascara de arroz se logra un mejor resultado, el cual es hasta el doble de la resistencia del estudio actual. Se observa que la permeabilidad obtenida en estos concretos permeables tiende a tener un comportamiento inversamente dependiente al desempeño mecánico, en donde, los resultados con resistencias a la flexión y compresión más bajos corresponden a las permeabilidades más altas.

Cabe destacar que los concretos con residuos de obras civiles poseen una mejor resistencia a la compresión frente a los concretos actuales en estudio, sin embargo, una menor permeabilidad, de igual manera sucede con los concretos que utilizan cáscara de arroz y su resistencia a la flexión y permeabilidad.

En el caso de la comparación con otros estudios de concreto permeable con utilización de vidrio reciclado, se debe indicar: actualmente son limitados los estudios existentes al respecto, sin embargo, al comparar los resultados obtenidos con los mostrados en el Apéndice 3, se denota que los mejores resultados obtenidos en el estudio de Corso, M., Amâncio Silveira, D. E., Mateus Alves, G. H., Keylla Berto, L., Dias de Albuquerque, A. C. y Soto Herek Rezende, L. C. (2019) utilizaron un porcentaje de vidrio de únicamente 5% y una relación a/c significativamente menor a la utilizada

en la investigación actual, de igual manera se expone una resistencia a la compresión realmente baja. Por otro lado, se tiene un resultado de coeficiente de permeabilidad sumamente alto, por lo tanto, no se presenta un correcto balance entre el desempeño mecánico y la permeabilidad. Los resultados del proyecto de Bernardo, A., Flávio, L. y Mendes, J. (2018) con la utilización de vidrio muestran que la resistencia a la flexión fue mayor respecto de los resultados actuales, pero con menores resultados de permeabilidad. Se debe recalcar que los resultados de Bernardo, A., Flávio, L. y Mendes, J. (2018) se obtienen con un tamaño máximo de agregado menor que el estudio actual, esto compromete los resultados de permeabilidad, y a la vez mejora el desempeño mecánico. Lo anterior se debe a que, al poseer una menor granulometría, los poros tienden a disminuir, y así aminora el flujo del agua dentro del material, a la vez, aumenta la cantidad de superficie de contacto entre los agregados, mejorando así la resistencia.

Los resultados de los concretos permeables convencionales del Apéndice 3, muestran que los mejores desempeños mecánicos corresponden a los proyectos de Carls, B. (2018) y Nguyen, D. H. (2014), es importante mencionar lo siguiente: estos proyectos utilizaron la metodología de diseño de mezcla de Nguyen, D. H. (2014). Por otro lado, el mejor coeficiente de permeabilidad obtenido corresponde a la investigación de Corso, M., Amâncio Silveira, D. E., Mateus Alves, G. H., Keylla Berto, L., Dias de Albuquerque, A. C. y Soto Herek Rezende, L. C. (2019), a la vez al ser esta la cual obtuvo uno de los desempeños mecánicos más bajos entre los comparados. Cabe recalcar que el resultado de Nguyen, D. H. (2014) se obtiene con un agregado con dimensión máxima de 4 mm, lo cual provoca lo mencionado, el pequeño tamaño del agregado mejora la resistencia a la compresión, pero, disminuye significativamente el coeficiente de permeabilidad. Al comparar los resultados del estudio presente y los del concreto permeable del Apéndice 3, se analiza estos se ubican en medio de los resultados de los demás proyectos, tanto permeables como de resistencia a la compresión, son superados en su totalidad únicamente por los resultados de resistencia a la flexión. Sin embargo, como se dice anteriormente, los resultados de resistencia a la flexión obtenidos cumplen con los mínimos estipulados por la norma ABNT NBR 16146-15.

Conclusiones

1. El vidrio molido de tipo soda-cal transparente utilizado en la sustitución parcial del cemento se tamiza en el tamiz de 75 μm (#200), por lo tanto, presenta un tamaño característico máximo 75 μm .
2. El agregado grueso utilizado en el presente proyecto corresponde a una piedra 7 según la clasificación de ASTM C33-18, además presenta un módulo de finura de 6,01 y un tamaño característico máximo de 19 mm.
3. El agregado fino utilizado en el presente proyecto corresponde a una arena fina según la clasificación de Perles, P. (2006), además presenta un módulo de finura de 1,97 y un tamaño característico máximo de 6,3 mm.
4. Utilizando el proceso de la norma ABNT NM 52-03, ABNT NM 53-03 y ABNT NM 30-01, se obtiene una masa específica de 2,66 g/cm^3 y 2,76 g/cm^3 para el agregado fino y grueso, así como una absorción de 4,35% y 0,14% respectivamente. Datos utilizados en el desarrollo de la metodología de diseño de mezcla de Nguyen, D. H.
5. El porcentaje de absorción total de los agregados a considerar al aplicar la metodología de diseño de mezcla de Nguyen, D. H. es de 0,38%. Este dato permite obtener la cantidad de agua de saturación necesaria en cada mezcla de concreto permeable realizada.
6. La masa específica de cada cemento utilizado según el procedimiento de la norma ABNT NM 16605-17, corresponde a 3,02, 2,97, 2,95 y 2,83 g/cm^3 para CP II F, CP V, CP II Z y CP IV respectivamente. Datos utilizados en el desarrollo de la metodología de diseño de mezcla de Nguyen, D. H.
7. Las relaciones a/c obtenidas con el procedimiento estipulado por Nguyen, D.H. para cada mezcla de concreto estudiada corresponden a valores más altos que los concretos permeables convencionales, esto se debe a la absorción adicional proporcionada por el vidrio molido.
8. Al aplicar la prueba de asentamiento en los concretos permeables estudiados no se presentó un cambio de forma o altura, indicando así que los concretos poseen una buena cohesión.
9. Las diferencias entre las masas específicas teóricas y las obtenidas con el ensayo a concreto en condición seca demuestran que el método utilizado respeta y mantiene los parámetros teóricos en sus resultados.
10. La diferencia del valor de índice de vacíos teórico y real se causa por el coronamiento aplicado en los cuerpos de prueba al obtener el valor experimental, por lo tanto, este valor no es confiable para trabajar.
11. El resultado de f_c más alto lo obtuvo el concreto con CP V con 14,1 MPa, seguido por CP II F, luego CP II Z y por último CP IV.
12. El resultado de resistencia a la flexión a los 28 días más alto lo obtuvo el concreto con CP V con 1,27 MPa, seguido por CP II F, luego CP IV y por último CP II Z. Indicando así que al sustituir un 10 % del cemento CP V por vidrio molido, se obtiene una mezcla aglutinante mejor que las realizadas con los otros cementos en estudio.
13. La mezcla de cemento y vidrio con mejor capacidad aglutinante, según la comparación entre porcentaje de vacíos y resistencia mecánica, corresponde a la

- que utiliza CP V seguido por CP II F, luego CP II Z y por último CP IV.
14. Las resistencias a la compresión obtenidas no cumplen con el mínimo de 20 MPa estipulado en la norma ABNT NBR 16146-15, sin embargo, las resistencias a la flexión si cumplen el mínimo de 1,0 MPa para un uso en aceras o calles de tránsito leve.
 15. Las permeabilidades obtenidas de los cuatro concretos son significativamente iguales, siendo estos valores iguales a 10,0, 9,6, 8,3 y 9,3 mm/s para los concretos con CP II F, CP II Z, CP V y CP IV respectivamente, indicando así una alta precisión del método empleado con respecto al coeficiente de permeabilidad.
 16. Los concretos realizados poseen un coeficiente de permeabilidad mayor a 3600 mm/h, por lo tanto, se clasifican como concretos altamente permeables según la norma ABNT NBR 16146-15.
 17. El coeficiente de correlación de Pearson indica que la resistencia a la flexión en los concretos tiende a ser independiente de la cantidad de vidrio participante, dentro de los parámetros utilizados en el estudio.
 18. Los resultados del desempeño mecánico de los concretos en estudio tienden a ser linealmente dependientes, o sea, si se obtiene mayor f_c , se obtendrá mayor resistencia a la flexión.
 19. La prueba de Shapiro-Wilk indicó que la totalidad de los datos trabajados poseen una distribución normal, por lo tanto, se permitió realizar un análisis de varianza (ANOVA).
 20. La prueba ANOVA indica: los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de todos los concretos son diferentes con un 95% de confianza, confirmando así que el f_c más alto lo obtuvo el concreto con CP V, seguido por CP II F, luego CP II Z y por último CP IV.
 21. La prueba ANOVA indica: los resultados del ensayo de resistencia a la flexión para los concretos con CP II F y CP V son estadísticamente iguales con un 95% de confianza, de igual manera los resultados del ensayo de flexión para los concretos con CP II Z y CP IV. Esto permite una comparación de resultados más precisa, mostrando que el valor más alto de flexión corresponde a los concretos con CP II F y CP V, seguidos por los concretos con CP II Z y CP IV.
 22. La prueba ANOVA indica: los resultados de permeabilidad de todos los concretos son estadísticamente iguales con un 95% de confianza. Esto confirma la alta precisión del método empleado con respecto al coeficiente de permeabilidad.
 23. El concreto que obtuvo los mejores resultados mecánicos y permeable, además del mejor desempeño aglutinante de la mezcla de cemento con 10% de vidrio corresponde al CP V.
 24. Al comparar los resultados con otros proyectos de concreto permeable utilizando materiales reciclados, el concreto actual se encuentra entre los mejores resultados junto con la utilización de residuos de obras. Es más ecológico el uso de vidrio molido.
 25. Los resultados obtenidos en comparación con los de concretos permeables convencionales mostrados del Apéndice 3, se encuentran dentro de la media de ellos, tanto en el ámbito mecánico, como permeable. Esto indica que los concretos estudiados se comportan de una manera similar a los concretos permeables convencionales del Apéndice 3.
 26. Al obtener un coeficiente de permeabilidad de clase alta, sobrepasando considerablemente su límite, se permite disminuir la cantidad de vacíos para aminorar este valor, y sin embargo, aumentar la resistencia mecánica.

Recomendaciones

1. Utilizar envases de vidrio correctamente lavados, de esta manera se asegura la menor cantidad posible de contaminación del material molido y así se evita obtener reacciones que perjudiquen el desempeño mecánico, permeable y durabilidad del concreto.
2. Utilizar vibración como método de compactación en cilindros de 10x20 cm, de esta manera se puede controlar de mejor manera los parámetros teóricos requeridos para la elaboración de los especímenes según la norma ABNT NBR 5738-15.
3. Estudiar variaciones de los métodos de dosificación para incluir adición o sustitución de los componentes por agregados reciclados, ya que actualmente las metodologías de diseño de mezcla no contemplan la implementación de materiales diferentes a piedra, arena, agua y cemento.
4. Procurar la utilización de moldes con la mayor similitud posible de dimensiones y material, para así evitar diferencias en las condiciones de los cuerpos de prueba en los que son aplicados los ensayos.
5. Realizar cuerpos de prueba para ser utilizados únicamente en la prueba de obtención de masa específica e índice de vacíos en estado endurecido. De esta manera se procura obtener resultados más confiables y significativos en dichas pruebas.
6. Estudiar maneras de colocación de concreto en el campo, con base en mantener la masa específica del material. De esta manera replicar los resultados obtenidos con la metodología de dosificación de Nguyen D.H. entre el laboratorio y el campo.
7. Buscar experimentalmente una mayor resistencia mecánica del proyecto actual, disminuyendo el volumen de vacíos. Se parte del hecho de que los resultados presentes obtenidos poseen una permeabilidad alta.
8. Ejecutar un estudio de la durabilidad del concreto utilizado ante las sustancias a las cuales puede ser expuesto a lo largo de su uso. Para así investigar si los materiales utilizados presentan reacciones que perjudiquen al concreto a un largo plazo.
9. Realizar un análisis químico para comprender de mejor manera las reacciones químicas provocada por la utilización del vidrio soda-cal molido a 75µm con los demás componentes utilizados, así como la reacción que este tendría utilizando diferentes posibles materiales.
10. Investigar la existencia de posibles reacciones químicas las cuales perjudiquen el desempeño físico-mecánico y permeable de los concretos estudiados al ser expuestos ante pinturas u otros materiales comúnmente utilizados sobre aceras y calles.
11. Realizar un estudio sobre el comportamiento y reacción química de cada una de las mezclas de cemento y vidrio molido elaboradas, para así comprender de mejor manera su carácter aglutinante.

Apéndices

A continuación, se presenta la lista de anexos adjuntos en el documento, seguido de cada uno de ellos según corresponde.

Apéndice 1: Prueba estadística Shapiro Wilk.

Apéndice 2: Prueba estadística ANOVA.

Apéndice 3: Resultado de desempeño del concreto permeable de proyectos varios.

Apéndice 1. Prueba estadística Shapiro Wilk

A continuación, se muestran las tablas correspondientes a las pruebas estadísticas de Shapiro Wilk para las muestras de los cementos en estudio para los cuerpos de prueba

correspondientes a los ensayos de flexión, permeabilidad y a cada una de sus edades para el ensayo de compresión. El proceso para obtener el resultado de estas se encuentra en la sección de "Metodología".

Ensayo compresión

TABLA 1. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II F Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 7 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	Xi	MED	(Xi-MED) ²	Σ(xi-MED) ²	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	8,6	9,4	0,6136	1,308	0,6431	9,9	-1,3	-1,0973	0,788	0,05	0,920	0,472	La distribución es normal
2	9,0		0,1469		0,2806	9,9	-0,9						
3	9,4		0,0003		0,0875	9,5	-0,1						
4	9,5		0,0136			9,4							
5	9,9		0,2669			9,0							
6	9,9		0,2669			8,6							

TABLA 2. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II F Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 14 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	Xi	MED	(Xi-MED) ²	Σ(xi-MED) ²	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	10,3	12,1	3,3003	6,028	0,6431	13,5	-3,2	-2,4209	0,788	0,05	0,972	0,883	La distribución es normal
2	11,6		0,2669		0,2806	12,8	-1,2						
3	12,1		0,0003		0,0875	12,4	-0,3						
4	12,4		0,0803			12,1							
5	12,8		0,4669			11,6							
6	13,5		1,9136			10,3							

TABLA 3. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II F Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 28 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	Xi	MED	(Xi-MED) ²	Σ(xi-MED) ²	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	11,2	12,8	2,5600	9,180	0,6431	14,5	-3,3	-2,9149	0,788	0,05	0,926	0,494	La distribución es normal
2	11,4		1,9600		0,2806	14,1	-2,7						
3	12,6		0,0400		0,0875	13,0	-0,4						
4	13,0		0,0400			12,6							
5	14,1		1,6900			11,4							
6	14,5		2,8900			11,2							

TABLA 4. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP V Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 7 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	X_i	MED	$(X_i - \text{MED})^2$	$\sum(X_i - \text{MED})^2$	a_i	$X_i \text{ INV}$	$\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$	$a_i * \text{Dif}$	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	9,7	11,8	4,4803	15,168	0,6431	14,7	-5,0	-3,7486	0,788	0,05	0,926	0,498	La distribución es normal
2	11,0		0,6669		0,2806	12,9	-1,9						
3	11,3		0,2669		0,0875	11,3	0,0						
4	11,3		0,2669			11,3							
5	12,9		1,1736			11,0							
6	14,7		8,3136			9,7							

TABLA 5. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP V Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 14 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	X_i	MED	$(X_i - \text{MED})^2$	$\sum(X_i - \text{MED})^2$	a_i	$X_i \text{ INV}$	$\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$	$a_i * \text{Dif}$	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	11,6	12,8	1,4803	4,148	0,6431	14,0	-2,4	-1,9993	0,788	0,05	0,964	0,815	La distribución es normal
2	12,2		0,3803		0,2806	13,7	-1,5						
3	12,5		0,1003		0,0875	12,9	-0,4						
4	12,9		0,0069			12,5							
5	13,7		0,7803			12,2							
6	14,0		1,4003			11,6							

TABLA 6. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP V Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 28 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	X_i	MED	$(X_i - \text{MED})^2$	$\sum(X_i - \text{MED})^2$	a_i	$X_i \text{ INV}$	$\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$	$a_i * \text{Dif}$	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	12,5	14,1	2,6136	15,248	0,6431	17,0	-4,5	-3,6760	0,788	0,05	0,886	0,338	La distribución es normal
2	12,8		1,7336		0,2806	15,4	-2,6						
3	13,2		0,8403		0,0875	13,8	-0,6						
4	13,8		0,1003			13,2							
5	15,4		1,6469			12,8							
6	17,0		8,3136			12,5							

TABLA 7. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II Z Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 7 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	X_i	MED	$(X_i - \text{MED})^2$	$\sum(X_i - \text{MED})^2$	a_i	$X_i \text{ INV}$	$\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$	$a_i * \text{Dif}$	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	9,7	10,7	0,9025	3,095	0,6431	11,8	-2,1	-1,7240	0,788	0,05	0,960	0,781	La distribución es normal
2	9,9		0,5625		0,2806	11,2	-1,3						
3	10,6		0,0025		0,0875	10,7	-0,1						
4	10,7		0,0025			10,6							
5	11,2		0,3025			9,9							
6	11,8		1,3225			9,7							

TABLA 8. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II Z Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 14 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	X_i	MED	$(X_i - \text{MED})^2$	$\sum(X_i - \text{MED})^2$	a_i	$X_i \text{ INV}$	$\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$	$a_i * \text{Dif}$	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	9,5	10,9	1,8225	3,695	0,6431	11,9	-2,4	-1,8889	0,788	0,05	0,966	0,832	La distribución es normal
2	10,4		0,2025		0,2806	11,6	-1,2						
3	10,8		0,0025		0,0875	10,9	-0,1						
4	10,9		0,0025			10,8							
5	11,6		0,5625			10,4							
6	11,9		1,1025			9,5							

TABLA 9. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II Z Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 28 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	X_i	MED	$(X_i - \text{MED})^2$	$\sum(X_i - \text{MED})^2$	a_i	$X_i \text{ INV}$	$\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$	$a_i * \text{Dif}$	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	9,5	11,1	2,5600	5,360	0,6431	11,9	-2,4	-2,0660	0,788	0,05	0,796	0,061	La distribución es normal
2	10,1		1,0000		0,2806	11,9	-1,8						
3	11,5		0,1600		0,0875	11,7	-0,2						
4	11,7		0,3600			11,5							
5	11,9		0,6400			10,1							
6	11,9		0,6400			9,5							

TABLA 10. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP IV Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 7 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	X_i	MED	$(X_i - \text{MED})^2$	$\sum(X_i - \text{MED})^2$	a_i	$X_i \text{ INV}$	$\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$	$a_i * \text{Dif}$	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	5,0	7,1	4,3403	7,048	0,6431	8,2	-3,2	-2,5120	0,788	0,05	0,895	0,373	La distribución es normal
2	6,6		0,2336		0,2806	8,0	-1,4						
3	7,0		0,0069		0,0875	7,7	-0,7						
4	7,7		0,3803			7,0							
5	8,0		0,8403			6,6							
6	8,2		1,2469			5,0							

TABLA 11. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP IV Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 14 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	X_i	MED	$(X_i - \text{MED})^2$	$\sum(X_i - \text{MED})^2$	a_i	$X_i \text{ INV}$	$\text{Dif}(X_i - X_i \text{ INV})$	$a_i * \text{Dif}$	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	8,0	8,7	0,5378	1,413	0,6431	9,5	-1,5	-1,1786	0,788	0,05	0,983	0,962	La distribución es normal
2	8,3		0,1878		0,2806	9,0	-0,7						
3	8,7		0,0011		0,0875	8,9	-0,2						
4	8,9		0,0278			8,7							
5	9,0		0,0711			8,3							
6	9,5		0,5878			8,0							

TABLA 12. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP IV Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 28 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	8,9	9,6	0,5378	3,593	0,6431	11,1	-2,2	-1,7322	0,788	0,05	0,835	0,136	La distribución es normal
2	9,1		0,2844		0,2806	10,2	-1,1						
3	9,2		0,1878		0,0875	9,3	-0,1						
4	9,3		0,1111			9,2							
5	10,2		0,3211			9,1							
6	11,1		2,1511			8,9							

Ensayo Flexión

TABLA 13. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II F Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 28 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	1,2	1,2	0,0038	0,011	0,6431	1,3	-0,1	-0,1021	0,788	0,05	0,956	0,747	La distribución es normal
2	1,2		0,0007		0,2806	1,3	-0,1						
3	1,2		0,0003		0,0875	1,2	0,0						
4	1,2		0,0000			1,2							
5	1,3		0,0018			1,2							
6	1,3		0,0043			1,2							

TABLA 14. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP V Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 28 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	1,2	1,3	0,0038	0,021	0,6431	1,4	-0,2	-0,1350	0,788	0,05	0,881	0,318	La distribución es normal
2	1,2		0,0018		0,2806	1,3	-0,1						
3	1,2		0,0008		0,0875	1,2	0,0						
4	1,2		0,0004			1,2							
5	1,3		0,0018			1,2							
6	1,4		0,0120			1,2							

TABLA 15. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II Z Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 28 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	1,0	1,1	0,0041	0,011	0,6431	1,1	-0,1	-0,0960	0,788	0,05	0,802	0,068	La distribución es normal
2	1,0		0,0032		0,2806	1,1	-0,1						
3	1,1		0,0003		0,0875	1,1	0,0						
4	1,1		0,0004			1,1							
5	1,1		0,0016			1,0							
6	1,1		0,0018			1,0							

TABLA 16. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP IV Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO A LOS 28 DÍAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	1,0	1,1	0,0059	0,020	0,6431	1,2	-0,1	-0,1282	0,788	0,05	0,842	0,163	La distribución es normal
2	1,1		0,0021		0,2806	1,2	-0,1						
3	1,1		0,0020		0,0875	1,2	-0,1						
4	1,2		0,0024			1,1							
5	1,2		0,0024			1,1							
6	1,2		0,0047			1,0							

Ensayo de Permeabilidad

TABLA 17. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II F Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO ENSAYO DE PERMEABILIDAD													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	22918,3	35991,7	170913310	499602580	0,6872	48249,1	-25330,8	-20572,472	0,788	0,05	0,847	0,254	La distribución es normal
2	26962,7		81522309,5		0,1677	45836,7	-18873,9						
3	45836,7		96923006,2			26962,7							
4	48249,1		150243954			22918,3							

TABLA 18. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP V Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO ENSAYO DE PERMEABILIDAD													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	21319,4	30025,9	75802964,6	118817305	0,6872	35259,0	-13939,6	-10313,989	0,788	0,05	0,895	0,388	La distribución es normal
2	29572,0		205959,701		0,1677	33953,1	-4381,0						
3	33953,1		15423017,2			29572,0							
4	35259,0		27385363,8			21319,4							

TABLA 19. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP II Z Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO ENSAYO DE PERMEABILIDAD													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	29572,0	34434,2	23640747,2	123902781	0,6872	43654,0	-14081,9	-10246,491	0,788	0,05	0,847	0,254	La distribución es normal
2	30557,8		15026791,1		0,1677	33953,1	-3395,3						
3	33953,1		231488,363			30557,8							
4	43654,0		85003754,1			29572,0							

TABLA 20. PRUEBA SHAPIRO WILK DE MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTO TIPO CP IV Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO ENSAYO DE PERMEABILIDAD													
i	Xi	MED	(Xi-MED)^2	Σ(xi-MED)^2	ai	Xi INV	Dif(Xi-Xi INV)	ai*Dif	SW t	Nivel de Significancia	SW c	p-value	Resultado
1	28647,9	33632,3	24844346,1	36816611,4	0,6872	36669,3	-8021,4	-5731,314	0,788	0,05	0,892	0,380	La distribución es normal
2	33953,1		102886,13		0,1677	35259,0	-1305,9						
3	35259,0		2645978,6			33953,1							
4	36669,3		9223400,57			28647,9							

Apéndice 2. Prueba estadística ANOVA

A continuación, se muestra las tablas correspondientes a las pruebas de varianza ANOVA mencionadas en la sección de "Resultados".

Ensayo compresión

TABLA 1. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES CEMENTOS Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN A UNA EDAD DE 7 DÍAS

i	CP II F	CP V	CP II Z	CP IV
1	8,6	9,7	9,7	5,0
2	9,0	11,0	9,9	6,6
3	9,4	11,3	10,6	7,0
4	9,5	11,3	10,7	7,7
5	9,9	12,9	11,2	8,0
6	9,9	14,7	11,8	8,2

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	6	56,3	9,383333333	0,261666667
Columna 2	6	70,9	11,81666667	3,033666667
Columna 3	6	63,9	10,65	0,619
Columna 4	6	42,5	7,083333333	1,409666667

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	73,9533333	3	24,65111111	18,52074464	5,4407E-06	3,098391212
Dentro de los grupos	26,62	20	1,331			
Total	100,573333	23				

Resultado: Las medias son diferentes

TABLA 2. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES CEMENTOS Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN A UNA EDAD DE 14 DÍAS

i	CP II F	CP V	CP II Z	CP IV
1	10,3	11,6	9,5	8,0
2	11,6	12,2	10,4	8,3
3	12,1	12,5	10,8	8,7
4	12,4	12,9	10,9	8,9
5	12,8	13,7	11,6	9,0
6	13,5	14,0	11,9	9,5

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	6	72,7	12,11666667	1,205666667
Columna 2	6	76,9	12,81666667	0,829666667
Columna 3	6	65,1	10,85	0,739
Columna 4	6	52,4	8,733333333	0,282666667

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	57,8445833	3	19,28152778	25,22934613	5,29854E-07	3,098391212
Dentro de los grupos	15,285	20	0,76425			
Total	73,1295833	23				

Resultado: Las medias son diferentes

TABLA 3. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES CEMENTOS Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN A UNA EDAD DE 28 DÍAS

i	CP II F	CP V	CP II Z	CP IV
1	11,2	12,5	9,5	8,9
2	11,4	12,8	10,1	9,1
3	12,6	13,2	11,5	9,2
4	13,0	13,8	11,7	9,3
5	14,1	15,4	11,9	10,2
6	14,5	17,0	11,9	11,1

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	6	76,8	12,8	1,836
Columna 2	6	84,7	14,11666667	3,049666667
Columna 3	6	66,6	11,1	1,072
Columna 4	6	57,8	9,633333333	0,718666667

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	69,0045833	3	23,00152778	13,78093431	4,2118E-05	3,098391212
Dentro de los grupos	33,3816667	20	1,669083333			
Total	102,38625	23				

Resultado: Las medias son diferentes

TABLA 4. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTOS CP V y CP II F CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN A UNA EDAD DE 28 DÍAS

i	CP II F	CP V
1	8,6	9,7
2	9,0	11,0
3	9,4	11,3
4	9,5	11,3
5	9,9	12,9
6	9,9	14,7

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	6	56,3	9,383333333	0,261666667
Columna 2	6	70,9	11,81666667	3,033666667

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	17,7633333	1	17,76333333	10,78090229	0,008241045	4,964602744
Dentro de los grupos	16,4766667	10	1,647666667			
Total	34,24	11				

Resultado: Las medias son diferentes

TABLA 5. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTOS CP II F y CP II Z CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN A UNA EDAD DE 28 DÍAS

i	CP II F	CP II Z
1	8,6	9,5
2	9,0	10,1
3	9,4	11,5
4	9,5	11,7
5	9,9	11,9
6	9,9	11,9

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	6	56,3	9,383333333	0,261666667
Columna 2	6	66,6	11,1	1,072

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	8,84083333	1	8,840833333	13,25793552	0,004528195	4,964602744
Dentro de los grupos	6,66833333	10	0,666833333			
Total	15,5091667	11				

Resultado: Las medias son diferentes

TABLA 6. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTOS CP II Z y CP IV CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN A UNA EDAD DE 28 DÍAS

i	CP IV	CP II Z
1	8,9	9,5
2	9,1	10,1
3	9,2	11,5
4	9,3	11,7
5	10,2	11,9
6	11,1	11,9

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	6	57,8	9,633333333	0,718666667
Columna 2	6	66,6	11,1	1,072

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6,45333333	1	6,453333333	7,207743857	0,022906211	4,964602744
Dentro de los grupos	8,95333333	10	0,895333333			
Total	15,4066667	11				

Resultado: Las medias son diferentes

Ensayo Flexión

TABLA 7. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES CEMENTOS Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE FLEXIÓN A UNA EDAD DE 28 DÍAS

i	CP II F	CP V	CP II Z	CP IV
1	1,188	1,205	1,012	1,037
2	1,224	1,224	1,020	1,0677
3	1,234	1,239	1,095	1,0684
4	1,245	1,246	1,096	1,162
5	1,293	1,309	1,117	1,163
6	1,316	1,376	1,119	1,182

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	6	7,49893829	1,249823048	0,00218305
Columna 2	6	7,59878768	1,266464613	0,00414091
Columna 3	6	6,45932081	1,076553469	0,00229893
Columna 4	6	6,67975582	1,113292637	0,00390158

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,16472626	3	0,054908753	17,5364816	8,05287E-06	3,098391212
Dentro de los grupos	0,06262231	20	0,003131116			
Total	0,22734857	23				

Resultado: Las medias son diferentes

TABLA 8. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTOS CP II F y CP V CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE FLEXIÓN A UNA EDAD DE 28 DÍAS

i	CP II F	CP V
1	1,188	1,205
2	1,224	1,224
3	1,234	1,239
4	1,245	1,246
5	1,293	1,309
6	1,316	1,376

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	6	7,49893829	1,249823048	0,00218305
Columna 2	6	7,59878768	1,266464613	0,00414091

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,00083082	1	0,000830825	0,26275487	0,619364952	4,964602744
Dentro de los grupos	0,03161978	10	0,003161978			
Total	0,0324506	11				

Resultado: Las medias son iguales

TABLA 9. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTOS CP II Z y CP IV CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE FLEXIÓN A UNA EDAD DE 28 DÍAS

i	CP II Z	CP IV
1	1,012	1,037
2	1,020	1,0677
3	1,095	1,0684
4	1,096	1,162
5	1,117	1,163
6	1,119	1,182

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	6	6,45932081	1,076553469	0,00229893
Columna 2	6	6,67975582	1,113292637	0,00390158

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,0040493	1	0,004049299	1,30611866	0,279722024	4,964602744
Dentro de los grupos	0,03100254	10	0,003100254			
Total	0,03505184	11				

Resultado:	Las medias son iguales
------------	------------------------

TABLA 10. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON CEMENTOS CP II F y CP IV CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE FLEXIÓN A UNA EDAD DE 28 DÍAS

i	CP II F	CP IV
1	1,188	1,037
2	1,224	1,0677
3	1,234	1,0684
4	1,245	1,162
5	1,293	1,163
6	1,316	1,182

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	6	7,49893829	1,249823048	0,00218305
Columna 2	6	6,67975582	1,113292637	0,00390158

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,05592166	1	0,05592166	18,3812997	0,001592862	4,964602744
Dentro de los grupos	0,03042313	10	0,003042313			
Total	0,08634479	11				

Resultado:	Las medias son diferentes
------------	---------------------------

Ensayo de Permeabilidad

TABLA 11. PRUEBA ANOVA EN MUESTRAS DE CONCRETO PERMEABLE CON DIFERENTES CEMENTOS Y 10% DE SUSTITUCIÓN DE VIDRIO MOLIDO PARA ENSAYO DE PERMEABILIDAD

i	CP II F	CP V	CP II Z	CP IV
1	22918,3	21319,4	29572,0	28647,9
2	26962,7	29572,0	30557,8	33953,1
3	45836,7	33953,1	33953,1	35259,0
4	48249,1	35259,0	43654,0	36669,3

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	4	143966,847	35991,71174	166534193
Columna 2	4	120103,4662	30025,86654	39605768,4
Columna 3	4	137736,8554	34434,21386	41300926,9
Columna 4	4	134529,2912	33632,3228	12272203,8

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	76666906,9	3	25555635,62	0,39359796	0,759908303	3,490294819
Dentro de los grupos	779139277	12	64928273,1			
Total	855806184	15				

Resultado: Las medias son iguales

Apéndice 3. Resultado de desempeño del concreto permeable de proyectos varios

Tipo de Residuo	Cantidad incorporada (%)	Dimensión máxima (mm) de agregado	Relación a/c	Porosidad (%)	Resistencia (Mpa)		Permeabilidad (mm/s)	Fuente
					Compresión	Flexión		
Residuos de obras civiles	30	9,5	0,3	20	15	-	8,1	GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MATA, L.; MIANKODILA, F. (2015)
Residuos de obras civiles	15	9,5	0,3	20	13	-	10	GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MATA, L.; MIANKODILA, F. (2015)
Ceniza de combustible pulverizadas	15	4,75	0,3	33,4	7,7	-	1,3	ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. (2015)
Corteza de palma	25	9,5	0,3	30	6,72	-	50	IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A. (2016)
Corteza de palma	75	9,5	0,3	31	5,33	-	69	IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A. (2016)
Cascara de arroz	10	12,7	0,25	-	-	3,44	7	Bernardo, A.; Flávio, L.; Reitz, R. (2018)
Cascara de arroz	30	12,7	0,25	-	-	1,31	25	Bernardo, A.; Flávio, L.; Reitz, R. (2018)
Vidrio	5*	9,5	0,3	14,53	5,46	2,34	60,92	Corso, M.; Amâncio Silveira, D. E.; Mateus Alves, G. H.; Keylla Berto, L.; Dias de Albuquerque, A. C.; Soto Herek Rezende, L. C. (2019)
Vidrio	10*	12,7 (75µm)	0,25	-	-	3,76	6,2	Bernardo, A.; Flávio, L.; Reitz, R. (2018)
Vidrio	5*	12,7 (75µm)	0,25	-	-	4,27	7,9	Bernardo, A.; Flávio, L.; Reitz, R. (2018)
-	-	9,5	0,3	24	10	-	46	IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A. (2016)
-	-	4,75	0,3	31,6	5,9	-	1,1	ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. (2015)
-	-	12,7	0,25	-	-	3,07	5	Bernardo, A.; Flávio, L.; Reitz, R. (2018)
-	-	9,5	0,3	15,54	7,38	1,45	80,45	Corso, M.; Amâncio Silveira, D. E.; Mateus Alves, G. H.; Keylla Berto, L.; Dias de Albuquerque, A. C.; Soto Herek Rezende, L. C. (2019)
-	-	12,5	0,34	10,4	21,2	5,1	11,2	Carls, B. (2018)
-	-	4	0,37	19,2	24,3	-	0,8	Nguyen, D. H. (2014)

Referencias

- ABNT. (1998). NBR NM 67 (Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone). Obtenido de: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDoce/nte/admin/arquivosUpload/15030/material/NBR%20NM%2067%20-%2098_aula.pdf
- ABNT. (2001). NBR NM 30 (Agregado miúdo - Determinação da absorção de água). Obtenido de: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/03/nbr-nm-0030-2001-agregado-mic3bado-determinac3a7c3a3o-da-absorsc3a3o-de-c3a1qua.pdf>
- ABNT. (2001). NBR NM 51 (Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”). Obtenido de: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/03/nbr-nm-0051-2001-agregado-graudo-ensaio-de-abrasao-los-angeles.pdf>
- ABNT. (2003a). NBR NM 52 (Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente). Obtenido de: <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDoce/nte/admin/arquivosUpload/17827/material/NBR%20NM%2052%20-.pdf>
- ABNT. (2003b). NBR NM 53 (Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água). Obtenido de: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDoce/nte/admin/arquivosUpload/17827/material/Nbr_nm53_2003.pdf
- ABNT. (2003c). NBR NM 248 (Agregados - Determinação da composição granulométrica). Obtenido de: http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosupload/17827/material/nbr_nm248_2003.pdf
- ABNT. (2015). NBR 16416 (Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos).
- ASTM. (2012). C1754 (Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete).
- ASTM. (2018). C33 (Standard Specification for Concrete Aggregates).
- Abelha Rocha, C. (2018). Concreto permeable: UFF investiga soluciones para una urbanización sostenible. Obtenido de: <http://www.uff.br/?q=noticias/15-08-2018/concreto-permeavel-uff-pesquisa-solucoes-para-uma-urbanizacao-sustentavel>
- ABNT. (2010). NBR 12142 (Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos). Obtenido de: <https://www.passeidireto.com/arquivo/30426028/nbr-12142-2010>
- ABNT. (2017). NBR 16605 (Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica).
- ABNT. (2018). NBR 16697 (Cimento Portland – Requisitos).
- ABNT. (2013). NBR 9781 (Peças de concreto para pavimentação- Especificação e métodos de ensaio). Obtenido de: <http://salvadorpremoldados.com.br/wp-content/uploads/2016/04/NORMA-ABNT-NBR-9781-PISOS.pdf>

- ABNT. (1987). NBR 9778 (Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica). Obtenido de: <https://www.passeidireto.com/arquivo/58073298/97110468-nbr-9778-argamassa-e-concreto-endurecidos-determinacao-da-absorcao-de-a>
- ABNT. (2015). NBR 5738 (Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova). Obtenido de: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDoente/admin/arquivosUpload/15030/material/NBR%205738%20-%2015_aula.pdf
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). (2010). 522R-10 (Report on pervious concrete). Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). (2011). 214R-11 (Guide to evaluation of strength test results of concrete). Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- Anwar A. (2016), The Influence of Waste Glass Powder As A Pozzolan Material In Concrete. International Journal of Civil Engineering and Technology, 7(6), pp.131 – 148.
- ArcGIS StoryMaps. (2019). *LID Example*. Obtenido de <https://storymaps.arcgis.com/stories/169245cd3cd44de18358e533f1efee68>
- Asociación Civil Argentina Pro Reciclado del PET (ARPET). (s.f). LA IMPORTANCIA DE RECICLAR. Obtenido de: <http://www.arpet.org/docs/La-importancia-de-reciclar.pdf>
- Bernardo, A.; Flávio, L.; Mendes, J. (2018). Concreto permeável com de vidro moído Permeable concrete with ground glass. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/330088585_Concreto_permeavel_com_de_vidro_moido_Permeable_concrete_wit_h_ground_glass
- Bernardo, A.; Flávio, L.; Reitz, R. (2018). Concreto permeável com cinza de casca de arroz residual Permeable concrete with residual rice hull ash. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/330088875_Concreto_permeavel_com_cinza_de_casca_de_arroz_residual_Permeable_concrete_with_residual_rice_hull_ash
- Bernardo, A. (3 de marzo de 2020). Especificaciones para el Proyecto en curso. (A. Rojas, Entrevistador)
- BIGNOZZI, M. C. (2015). Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. Cement and Concrete Composites, v. 55, p. 45-52.
- Bosi, J. M. (2020). PROPOSIÇÃO DE MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS FINAMENTE COMINÚIDOS. FURB, Blumenau, Brasil.
- Cabezas, J.; Zamora, L. (2019). RECICLAJE DE ENVASES DE VIDRIO. Obtenido de: http://www.csj.gob.sv/ambiente/images/RECICLAJE_ENVASES_VIDRIO.pdf
- Camacho Martínez, C. (s.f). COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE PEARSON. Obtenido de: <https://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf>
- Carls, B. (2018). COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE, RESISTÊNCIA MECÂNICA E DURABILIDADE DE CONCRETO PERMEÁVEL DOSADO POR TRÊS DIFERENTES MÉTODOS.
- CORINALDESI, L. N. P. (2005). Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. Waste Management, v. 25, n. 2, p. 197-201.
- Corso, M.; Amâncio Silveira, D. E.; Mateus Alves, G. H.; Keylla Berto, L.; Dias de Albuquerque, A. C.; Soto Herek Rezende, L. C. (2019). INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO EM CONCRETO PERMEÁVEL. Obtenido de:

- <http://rdu.unicesumar.edu.br/bitstream/123456789/3328/1/MARLA%20CORSO.pdf>
- CEMPRE. (s.f.). VIDRO. Obtenido de: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>
- CHEN, G. (2002). Glass recycling in cement production—an innovative approach. *Waste Management*, v. 22, n. 7, p. 747-753.
- Cuevas Kauffmann, R. L. (2017). Concreto [Diapositivas de Power Point]
- Dietrichson, A. (2019). Métodos Cuantitativos. Obtenido de: <https://bookdown.org/dietrichson/metodos-cuantitativos/>
- Espinoza, E. (Junio de 2017). Estudio de Vidrio Reciclado como componente para la Elaboración de Cementos Terciarios. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA, ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN, Cartago, Costa Rica.
- FEDERICO, L. M.; CHIDIAC, S. E. (2009) Waste of glass as a supplementary cementitious material in concrete-critical review of treatment methods, *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 8, p. 606-610.
- Fernández Arrieta, R. J.; Navas Carro, A. (2010). Concreto permeable: Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. Obtenido de: <https://core.ac.uk/download/pdf/67716628.pdf>
- Flores, V. (s.f). RECICLAJE DE VIDRIO. Obtenido de: https://www.academia.edu/7165632/RECICLAJE_DE VIDRIO
- Flores Ruiz, E.; Miranda Novales, M. G.; Villasís-Keever, M. A. (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial*. Obtenido de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/ram/v64n3/2448-9190-ram-64-03-0364.pdf>
- GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MATA, L.; MIANKODILA, F. (2015). Effect of recycled materials and compaction methods on the mechanical properties and solar reflectance index of pervious concrete. *Revista Ingeniería de Construcción*, v. 30, n. 3, p. 159-167. Obtenido de: https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v30n3/en_a_rt01.pdf
- Garza, J. (14 de Agosto de 2019). Costa Rica es el segundo país de Centroamérica que más vidrio recupera y recicla. *La Republica*.
- Global Cement and Concrete Association. (2020). Página principal. Obtenido de: <https://gccassociation.org>
- Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Obtenido de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/>
- Hernández Mora, L. F. (2018). Resistencia a compresión simple versus tiempo de curado en especímenes de concreto hidráulico usando cementos modificados. Obtenido de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/6532/1/43402.pdf>
- Hidrocreto. (s.f.). El concreto de hoy para el mañana. *Ciclopistas y áreas verdes*. Obtenido de <http://hidrocreto.com/aplicaciones.php?idioma=es>
- IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A. (2016). Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 115, p. 70-77. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/301246618_Effect_of_palm_oil_clinker_incorporation_on_properties_of_pervious_concrete
- Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC). (s.f.). Normativa. Obtenido de: <https://www.iccyc.com/Normativa>

- IMCYC. (2009). Cementos hidráulicos: Especificaciones y métodos de prueba. Obtenido de: <http://www.imcyc.com/ct2009/jun09/PROBLEMAS.pdf>
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2000). Avances en la tecnología del concreto. Obtenido de: <http://www.imcyc.com/revista/2000/octubre2000/concreto.htm>
- INTECO. (2015). Construcción. Cemento hidráulico. Especificaciones y Requisitos.
- JANI, Y.; HOGLAND, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 2, n. 3, p. 1767-1775.
- KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. (2013). Chemical behavior of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 74-80.
- Lorca Aranda, P. (2014). Efecto de la adición de hidróxido cálcico sobre mezclas con altas sustitución de cemento por ceniza volante. Obtenido de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/39340/Lorca%20-%20EFECTO%20DE%20LA%20ADICIÓN%20DE%20HIDRÓXIDO%20CÁLCICO%20SOBRE%20MEZCLAS%20CON%20ALTA%20SUSTITUCIÓN%20DE%20CEMENTO%20P....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MINITAB. (2019). ¿Qué es ANOVA? Obtenido de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>
- Nguyen, D. H. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. Caen, France: Elsevier Ltd.
- National Concrete Pavement Technology Center. (2006). Mix design development for pervious concrete in cold weather. Estados Unidos: Center for Transportation, Iowa State University.
- Obla, K. H.; Lobo, C. L. (Mayo de 2007). Acceptance Criteria for Durability Tests. Minimizing the risks of accepting defective concrete or rejecting acceptable concrete. Obtenido de National Ready Mixed Concrete Association: <https://www.nrmca.org/research/ci2905obla.pdf>
- Obras por expansión. (2017). Cáñamo, la fibra ecoamiga que genera ahorros a largo plazo. Obtenido de <https://obras.expansion.mx/soluciones/2017/06/03/canamo-la-fibra-ecoamigable-que-genera-ahorros-a-largo-plazo>
- Obras por expansión. (2017). Tipo Lego. Obtenido de <https://obras.expansion.mx/soluciones/2017/05/14/bloques-y-columnas-de-plastico-para-construir-vivienda-sin-cemento>
- Payá, J. (2012). La “transmutación” sostenible de los residuos para nuevas materias primas en el ámbito del concreto. Obtenido de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/50095/Paya%20-%20La%20%22transmutacion%22%20sostenible%20de%20los%20residuos%20para%20nuevas%20materias%20primas%20en%20el%20ámbito%20del....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Perles, P. (2006). Hormigón Armado. Obtenido de: <https://books.google.com.br/books?id=4fLpxffkb90C&lpg=PA30&dq=clasificaci%C3%B3n%20arena%20modulo%20de%20fibras%20de%20concreto&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
- Polanco Rodríguez, A. (2012). Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto. Obtenido de: <http://fing.uach.mx/licenciaturas/LC/2012/01/26/MANUAL LAB DE CONCRETO.pdf>
- PORRAS MORALES, J. M. (2017). Metodología de diseño para concretos permeables y sus respectivas permeabilidad

- correlaciones de permeabilidad. Obtenido de:
<https://core.ac.uk/download/pdf/83116069.pdf>
- Portland Cement Association. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. México: PCA, 456p.
- Revista Construcción y Tecnología en Concreto. (2019). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. *LA SUSTENTABILIDAD Y EL CONCRETO PERMEABLE*. Obtenido de <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/contenido/posibilidades-del-concreto/590-la-sustentabilidad-y-el-concreto-permeable>
- Rivera, G. A. (2009). CONCRETO SIMPLE. Obtenido de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngenieriaCivil/Geotecnia/profesor_gerardo_rivera/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%20de%202009/Tecnolog%EDa%20del%20Concreto%20-%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2006%20-%20Resistencia.pdf
- SCHWARZ, N.; CAM, H.; NEITHALATH, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 6, p. 486-496.
- SHAO, Y. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 1, p. 91-100.
- Solano Cerdas, C. (2009). Análisis de la flexotracción del concreto permeable. Obtenido de:
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6253/analisisdelaflexotracciondelconcretopermeable.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- TAHA, B.; NOUNU, G. (2008). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 5, p. 713-720.
- Tecnosil. (2019). *QUAIS SÃO AS NORMAS ASSOCIADAS AO USO DE CONCRETO?* Obtenido de:
<https://www.tecnosilbr.com.br/quais-normas-estao-associadas-ao-uso-de-concreto-2/>
- Tennis, P. D.; Akers, D. J.; Leming, M. L. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Obtenido de:
http://myscmap.sc.gov/marine/NERR/pdf/PerviousConcrete_pavements.pdf
- TRINDADE, G. H. (2015). Influência da incorporação de cinza de casca do arroz e sílica ativa no cimento Portland frente à reação álcali-sílica: desenvolvimento de uma nova proposta de método para avaliação da RAS em materiais suplementares ao cimento Portland. 2015. 178 p., il. Tese (Doutorado em Construção Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Universidad Nacional de Colombia. (17 de Septiembre de 2015). Reducir el impacto ambiental en la producción de cemento. Obtenido de <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/396-reducir-el-impacto-ambiental-en-la-produccion-de-cemento>
- Villegas Flores, N.; Parapinski Dos Santos, A. C. (2013). Análisis de indicadores para determinar el grado de sostenibilidad en concretos especiales. Obtenido de:
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6925/8554>
- ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. (2015). Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 289-295.
- ZHENG, M.; CHEN, S.; WANG, B. (2012). Mix design method for permeable base of porous concrete. *International Journal of Pavement Research and Technology*, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 102.

Anexos

A continuación, se presenta la lista de anexos adjuntos en el documento, seguido de cada uno de ellos correspondientemente.

Anexo 1. Características físicas y químicas de cementos comerciales. (Fuente: ABNT NBR 16697-18)

Anexo 2. Tabla de clasificación del agregado grueso. (Fuente: ASTM C33-18)

Anexo 3. Estándares de control del concreto para $f'c < 35$ MPa.

Anexo 4. Prueba estadística de acuerdo con los objetivos del estudio y la escala de medición de las variables. (Fuente: Flores Ruiz, E., Miranda Novales, M. G. y Villasís-Keever, M. A. (2017))

Anexo 5. Coeficientes a_{in} para el contraste de Shapiro-Wilks.

Anexo 6. Valores críticos de la distribución f (0,05).

Anexo 1. Características físicas y químicas de cementos comerciales. (Fuente: ABNT NBR 16697-18)

Tabela 1 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b —
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	—	—

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe original.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Tabela 2 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático		
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5				
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10		
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15		
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15		
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25		
Cimento Portland de alto forno ^b	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10		
Cimento Portland pozolânico ^c	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10		
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a			ARI	90 – 100	0	0	0 – 10	
Cimento Portland branco	Estrutural			25, 32 ou 40	—	75 – 100	—	—	0 – 25
	Não estrutural								

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

^b O teor máximo da somatória de adições (escória granulada de alto –forno e material carbonático) deve ser de 75%.

^c O teor máximo da somatória de adições (material pozolânico e material carbonático) deve ser de 55%.

Tabela 3 - Requisitos químicos do cimento Portland (em porcentagem de massa)

Sigla ^a	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP IV	--	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP V ^b	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivado do cimento tipo CPV, não há limitação para RI e MgO.

Tabela 4 - Requisitos físicos e mecânicos

Sigla ^a	Classe	Finura	Tempo de início de pega min	Expansibilidade a quente mm	Resistência à compressão MPa				Índice de brancura -
		Resíduo peneira 75 µm %			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I CP I-S	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
CP II-E CP II-F	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
CP II-Z	40	≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP III CP IV	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	-
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-
CPB Estrutural	25	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 78
	32	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPB Não estrutural	-	≤ 12,0 ^b	≥ 60	≤ 5	-	≥ 5,0	≥ 7,0	≥ 10,0	≥ 82

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes aos sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b Resíduo na peneira 45 µm

Tabela 5 - Determinações facultativas

Sigla ^a	Classe	Enxofre na forma de sulfeto %	Tempo de fim de pega min	Expansibilidade a frio mm	Resistência à compressão aos 91 dias MPa	Anidrido carbônico (CO ₂) %
CP I	25, 32 ou 40	-	≤ 600	≤ 5	-	≤ 3,0%
CP I-S						≤ 5,5%
CP II-E	25, 32 ou 40	≤ 0,5				≤ 7,5%
CP II-F	25, 32 ou 40	-				≤ 11,5%
CP II-Z						≤ 7,5%
CP III	25	≤ 1,0	≤ 720		≥ 32,0	≤ 5,5%
	32				≥ 40,0	
	40				≥ 48,0	
CP IV	25	-			≥ 32,0	≤ 5,5%
	32				≥ 40,0	
	40			≥ 48,0		
CP V	ARI	-	≤ 600	-	≤ 5,5%	
CPB Estrutural	25, 32 ou 40	-	≤ 600	≤ 5	-	≤ 12,0
CPB Não estrutural	-	-			-	≤ 27,0

^a Estes requisitos podem ser aplicáveis também aos cimentos resistentes aos sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla original seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

Anexo 2. Tabla de clasificación del agregado grueso. (Fuente: ASTM C33-18)

Número de Tamaño	Tamaño nominal (Tamices con aberturas cuadradas)	Cantidades más finas que pasan por un tamiz (abertura cuadrada) en porcentaje en masa													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (3/8 in.)	4.75 mm (N°4)	2.36 mm (N° 8)	1.18 mm (N° 16)	300 um (N°50)
1	90 a 37.5 mm (3½ a 1½ in.)	100	90 a 100	—	25 a 60	—	0 a 15	—	0 a 5	—	—	—	—	—	—
2	63 a 37.5 mm (2½ a 1½ in.)	—	—	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	—	0 a 5	—	—	—	—	—	—
3	50 a 25.0 mm (2 a 1 in.)	—	—	—	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	—	0 a 5	—	—	—	—	—
357	50 a 4.75 mm (2 in. A N°4)	—	—	—	100	95 a 100	—	35 a 70	—	—	—	0 a 5	—	—	—
4	37.5 a 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	—	—	—	—	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	—	0 a 5	—	—	—	—
467	37.5 a 4.75 mm (1½ A N° 4)	—	—	—	—	100	95 a 100	—	35 a 70	—	10 a 30	—	—	—	—
5	25.0 a 9.5 mm (1 a ¾ in.)	—	—	—	—	—	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	—	—	—	—
56	25.0 a 4.75 mm (1 a ¾ in.)	—	—	—	—	—	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	—	—	—
57	25.0 a 4.75 mm (1 in. A N°4)	—	—	—	—	—	100	95 a 100	—	25 a 60	—	0 a 10	0 a 5	—	—
6	19.0 a 9.5 mm (¾ in a 3/8 in.)	—	—	—	—	—	—	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	—	—	—
67	19.0 a 4.75 mm (¾ in a N°4)	—	—	—	—	—	—	100	90 a 100	—	20 a 55	0 a 10	0 a 5	—	—
7	12.5 a 4.75 mm (½ in. A N°4)	—	—	—	—	—	—	—	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	—	—
8	9.5 a 2.36 mm (3/8 in a N°8)	—	—	—	—	—	—	—	—	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	—
89	9.5 a 1.18 mm (3/8 in a N°16)	—	—	—	—	—	—	—	—	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9 ^A	4.75 a 1.18 mm (N°4 a N°16)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

^AEl Agregado de número de tamaño 9 está definido en la norma terminología NTG/ASTM C 125 como un agregado fino. Esta incluido como un agregado grueso cuando está combinado con un material de número de tamaño 8 para crear un número de tamaño 89, que es un agregado grueso según está definido por la norma Terminología NTG/ASTM C 125.

Anexo 3. Estándares de control del concreto para $f'_c < 35$ MPa.

Estandares de control para concreto con $f_c < 35$ Mpa

Clase de operación	Desviación Estándar para diferentes estadares de control (MPa)				
	Excelente	Muy Bien	Bien	Considerable	Mal
Prueba de construcción general	Menor a 2,8	2,8 a 3,4	3,4 a 4,1	4,1 a 4,8	Mayor a 4,8
Prueba en laboratorio	Menor a 1,4	1,4 a 1,7	1,7 a 2,1	2,1 a 2,4	Mayor a 2,4

Anexo 4. Prueba estadística de acuerdo con los objetivos del estudio y la escala de medición de las variables. (Fuente: Flores Ruiz, E. (2017))

Objetivos del estudio	Variables y distribución	Tipo de muestra	Prueba recomendada
Comparar 2 promedios	Cuantitativas, distribución normal	Muestras relacionadas	t de Student
		Muestras independientes	t de Student
	Cuantitativas discontinuas y continuas sin distribución normal	Muestras relacionadas	Wilcoxon
		Muestras independientes	U Mann Whitney
Comparar ≥ 3 grupos	Cuantitativas, distribución normal	Muestras relacionadas	Análisis de varianza (ANOVA) de 2 vías
		Muestras independientes	ANOVA de una vía
	Cuantitativas discontinuas y continuas sin distribución normal	Muestras relacionadas	Friedman
		Muestras independientes	Kruskal-Wallis
Comparar 2 grupos	Cualitativas nominales y ordinales	Muestras relacionadas	McNemar
		Muestras independientes	Chi-cuadrada*
Comparar ≥ 3 grupos	Cualitativas nominales y ordinales	Muestras relacionadas	Q de Cochran
		Muestras independientes	Chi cuadrada
Correlación de 2 variables	Cuantitativas, distribución normal	Muestras independientes	Coefficiente de correlación de Pearson
	Cuantitativas discontinuas y continuas sin distribución normal	Muestras independientes	Coefficiente de correlación de Spearman

Anexo 5. Coeficientes a_{in} para el contraste de Shapiro-Wilks.

Coeficientes a_{in} para el contraste de Shapiro-Wilks

n	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2		0.7071										
3		0.7071	0.0000									
4		0.6872	0.1677									
5		0.6646	0.2413	0.0000								
6		0.6431	0.2806	0.0875								
7		0.6233	0.3031	0.1401	0.0000							
8		0.6052	0.3164	0.1743	0.0561							
9		0.5888	0.3244	0.1976	0.0947	0.0000						
10		0.5739	0.3291	0.2141	0.1224	0.0399						
11		0.5601	0.3315	0.2260	0.1429	0.0695	0.0000					
12		0.5475	0.3325	0.2347	0.1586	0.0922	0.0303					
13		0.5359	0.3325	0.2412	0.1707	0.1099	0.0539	0.0000				
14		0.5251	0.3318	0.2495	0.1802	0.1240	0.0727	0.0240				
15		0.5150	0.3306	0.2495	0.1878	0.1353	0.0880	0.0433	0.0000			
16		0.5056	0.3290	0.2521	0.1988	0.1447	0.1005	0.0593	0.0196			
17		0.4968	0.3273	0.2540	0.1988	0.1524	0.1109	0.0725	0.0359	0.0000		
18		0.4886	0.3253	0.2553	0.2027	0.1587	0.1197	0.0837	0.0496	0.0163		
19		0.4808	0.3232	0.2561	0.2059	0.1641	0.1271	0.0932	0.0612	0.0303	0.0000	
20		0.4734	0.3211	0.2565	0.2085	0.1686	0.1334	0.1013	0.0711	0.0422	0.0140	
21		0.4643	0.3185	0.2578	0.2119	0.1736	0.1339	0.1092	0.0804	0.0530	0.0263	0.0000
22		0.4590	0.3156	0.2571	0.2131	0.1764	0.1443	0.1150	0.0878	0.0618	0.0368	0.0122
23		0.4542	0.3126	0.2563	0.2139	0.1787	0.1480	0.1201	0.0941	0.0696	0.0459	0.0228
24		0.4493	0.3098	0.2554	0.2145	0.1807	0.1512	0.1245	0.0997	0.0764	0.0539	0.0321
25		0.4450	0.3069	0.2543	0.2148	0.1822	0.1539	0.1283	0.1046	0.0823	0.0610	0.0403
26		0.4407	0.3043	0.2533	0.2151	0.1836	0.1563	0.1316	0.1089	0.0876	0.0672	0.0476
27		0.4366	0.3018	0.2522	0.2152	0.1848	0.1584	0.1346	0.1128	0.0923	0.0728	0.0540
28		0.4328	0.2992	0.2510	0.2151	0.1857	0.1601	0.1372	0.1162	0.0965	0.0778	0.0598
29		0.4291	0.2968	0.2499	0.2150	0.1864	0.1616	0.1395	0.1192	0.1002	0.0822	0.0650
30		0.4254	0.2944	0.2487	0.2148	0.1870	0.1630	0.1415	0.1219	0.1036	0.0862	0.0697
31		0.4220	0.2921	0.2475	0.2145	0.1874	0.1641	0.1433	0.1243	0.1066	0.0899	0.0739
32		0.4188	0.2898	0.2463	0.2141	0.1878	0.1651	0.1449	0.1265	0.1093	0.0931	0.0777
33		0.4156	0.2876	0.2451	0.2137	0.1880	0.1660	0.1463	0.1284	0.1118	0.0961	0.0812
34		0.4127	0.2854	0.2439	0.2132	0.1882	0.1667	0.1475	0.1301	0.1140	0.0988	0.0844
35		0.4096	0.2834	0.2427	0.2127	0.1883	0.1673	0.1487	0.1317	0.1160	0.1013	0.0873
36		0.4068	0.2813	0.2415	0.2121	0.1883	0.1678	0.1496	0.1331	0.1179	0.1036	0.0900
37		0.4040	0.2794	0.2403	0.2116	0.1883	0.1683	0.1505	0.1344	0.1196	0.1056	0.0924
38		0.4015	0.2774	0.2391	0.2110	0.1881	0.1686	0.1513	0.1356	0.1211	0.1075	0.0947
39		0.3989	0.2755	0.2380	0.2104	0.1880	0.1689	0.1520	0.1366	0.1225	0.1092	0.0967
40		0.3964	0.2737	0.2368	0.2098	0.1878	0.1691	0.1526	0.1376	0.1237	0.1108	0.0986
41		0.3940	0.2719	0.2357	0.2091	0.1876	0.1693	0.1531	0.1384	0.1249	0.1123	0.1004
42		0.3917	0.2701	0.2345	0.2085	0.1874	0.1694	0.1535	0.1392	0.1259	0.1136	0.1020
43		0.3894	0.2684	0.2334	0.2078	0.1871	0.1695	0.1539	0.1398	0.1269	0.1149	0.1035
44		0.3872	0.2667	0.2323	0.2072	0.1868	0.1695	0.1542	0.1405	0.1278	0.1160	0.1049
45		0.3850	0.2651	0.2313	0.2065	0.1865	0.1695	0.1545	0.1410	0.1286	0.1170	0.1062
46		0.3830	0.2635	0.2302	0.2058	0.1862	0.1695	0.1548	0.1415	0.1293	0.1180	0.1073
47		0.3808	0.2620	0.2291	0.2052	0.1859	0.1695	0.1550	0.1420	0.1300	0.1189	0.1085
48		0.3789	0.2604	0.2281	0.2045	0.1855	0.1693	0.1551	0.1423	0.1306	0.1197	0.1095
49		0.3770	0.2589	0.2271	0.2038	0.1851	0.1692	0.1553	0.1427	0.1312	0.1205	0.1105
50		0.3751	0.2574	0.2260	0.2032	0.1847	0.1691	0.1554	0.1430	0.1317	0.1212	0.1113

Coefficientes a_{in} para el contraste de Shapiro-Wilks

i n	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
24	0.0107										
25	0.0200	0.0000									
26	0.0284	0.0094									
27	0.0358	0.0178	0.0000								
28	0.0424	0.0253	0.0084								
29	0.0483	0.0320	0.0159	0.0000							
30	0.0537	0.0381	0.0227	0.0076							
31	0.0585	0.0435	0.0289	0.0144	0.0000						
32	0.0629	0.0485	0.0344	0.0206	0.0068						
33	0.0669	0.0530	0.0395	0.0262	0.0187	0.0000					
34	0.0706	0.0572	0.0441	0.0314	0.0187	0.0062					
35	0.0739	0.0610	0.0484	0.0361	0.0239	0.0119	0.0000				
36	0.0770	0.0645	0.0523	0.0404	0.0287	0.0172	0.0057				
37	0.0798	0.0677	0.0559	0.0444	0.0331	0.0220	0.0110	0.0000			
38	0.0824	0.0706	0.0592	0.0481	0.0372	0.0264	0.0158	0.0053			
39	0.0848	0.0733	0.0622	0.0515	0.0409	0.0305	0.0203	0.0101	0.0000		
40	0.0870	0.0759	0.0651	0.0546	0.0444	0.0343	0.0244	0.0146	0.0049		
41	0.0891	0.0782	0.0677	0.0575	0.0476	0.0379	0.0283	0.0188	0.0094	0.0000	
42	0.0909	0.0804	0.0701	0.0602	0.0506	0.0411	0.0318	0.0227	0.0136	0.0045	
43	0.0927	0.0824	0.0724	0.0628	0.0534	0.0442	0.0352	0.0263	0.0175	0.0087	0.0000
44	0.0943	0.0842	0.0745	0.0651	0.0560	0.0471	0.0383	0.0296	0.0211	0.0126	0.0042
45	0.0959	0.0860	0.0765	0.0673	0.0584	0.0497	0.0412	0.0328	0.0245	0.0163	0.0081
46	0.0972	0.0876	0.0783	0.0694	0.0607	0.0522	0.0439	0.0357	0.0277	0.0197	0.0118
47	0.0986	0.0892	0.0801	0.0713	0.0628	0.0546	0.0465	0.0385	0.0307	0.0229	0.0153
48	0.0998	0.0906	0.0817	0.0731	0.0648	0.0568	0.0489	0.0411	0.0335	0.0259	0.0185
49	0.1010	0.0919	0.0832	0.0748	0.0667	0.0588	0.0511	0.0436	0.0361	0.0288	0.0215
50	0.1020	0.0932	0.0846	0.0764	0.0685	0.0608	0.0532	0.0459	0.0386	0.0314	0.0244

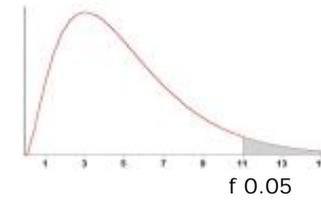
i n	23	24	25
45	0.0000		
46	0.0039		
47	0.0076	0.0000	
48	0.0111	0.0037	
49	0.0143	0.0071	0.0000
50	0.0174	0.0104	0.0035

Niveles de significación para el contraste de Shapiro-Wilks.

n	0.01	0.02	0.05	0.1	0.5	0.9	0.95	0.98	0.99
3	0.753	0.756	0.767	0.789	0.959	0.998	0.999	1.000	1.000
4	0.687	0.707	0.748	0.792	0.935	0.987	0.992	0.996	0.997
5	0.686	0.715	0.762	0.806	0.927	0.979	0.986	0.991	0.993
6	0.713	0.743	0.788	0.826	0.927	0.974	0.981	0.986	0.989
7	0.730	0.760	0.803	0.838	0.928	0.972	0.979	0.985	0.988
8	0.749	0.778	0.818	0.851	0.932	0.972	0.978	0.984	0.987
9	0.764	0.791	0.829	0.859	0.935	0.972	0.978	0.984	0.986
10	0.781	0.806	0.842	0.869	0.938	0.972	0.978	0.983	0.986
11	0.792	0.817	0.850	0.876	0.940	0.973	0.979	0.984	0.986
12	0.805	0.828	0.859	0.883	0.943	0.973	0.979	0.984	0.986
13	0.814	0.837	0.866	0.889	0.945	0.974	0.979	0.984	0.986
14	0.825	0.846	0.874	0.895	0.947	0.975	0.980	0.984	0.986
15	0.835	0.855	0.881	0.901	0.950	0.975	0.980	0.984	0.987
16	0.844	0.863	0.887	0.906	0.952	0.976	0.981	0.985	0.987
17	0.851	0.869	0.892	0.910	0.954	0.977	0.981	0.985	0.987
18	0.858	0.874	0.897	0.914	0.956	0.978	0.982	0.986	0.988
19	0.863	0.879	0.901	0.917	0.957	0.978	0.982	0.986	0.988
20	0.868	0.884	0.905	0.920	0.959	0.979	0.983	0.986	0.988
21	0.873	0.888	0.908	0.923	0.960	0.980	0.983	0.987	0.989
22	0.878	0.892	0.911	0.926	0.961	0.980	0.984	0.987	0.989
23	0.881	0.895	0.914	0.928	0.962	0.981	0.984	0.987	0.989
24	0.884	0.898	0.916	0.930	0.963	0.981	0.984	0.987	0.989
25	0.888	0.901	0.918	0.931	0.964	0.981	0.985	0.988	0.989
26	0.891	0.904	0.920	0.933	0.965	0.982	0.985	0.988	0.989
27	0.894	0.906	0.923	0.935	0.965	0.982	0.985	0.988	0.990
28	0.896	0.908	0.924	0.936	0.966	0.982	0.985	0.988	0.990
29	0.898	0.910	0.926	0.937	0.966	0.982	0.985	0.988	0.990
30	0.900	0.912	0.927	0.939	0.967	0.983	0.985	0.988	0.990
31	0.902	0.914	0.929	0.940	0.967	0.983	0.986	0.988	0.990
32	0.904	0.915	0.930	0.941	0.968	0.983	0.986	0.988	0.990
33	0.906	0.917	0.931	0.942	0.968	0.983	0.986	0.989	0.990
34	0.908	0.919	0.933	0.943	0.969	0.983	0.986	0.989	0.990
35	0.910	0.920	0.934	0.944	0.969	0.984	0.986	0.989	0.990
36	0.912	0.922	0.935	0.945	0.970	0.984	0.986	0.989	0.990
37	0.914	0.924	0.936	0.946	0.970	0.984	0.987	0.989	0.990
38	0.916	0.925	0.938	0.947	0.971	0.984	0.987	0.989	0.990
39	0.917	0.927	0.939	0.948	0.971	0.984	0.987	0.989	0.991
40	0.919	0.928	0.940	0.949	0.972	0.985	0.987	0.989	0.991
41	0.920	0.929	0.941	0.950	0.972	0.985	0.987	0.989	0.991
42	0.922	0.930	0.942	0.951	0.972	0.985	0.987	0.989	0.991
43	0.923	0.932	0.943	0.951	0.973	0.985	0.987	0.990	0.991
44	0.924	0.933	0.944	0.952	0.973	0.985	0.987	0.990	0.991
45	0.926	0.934	0.945	0.953	0.973	0.985	0.988	0.990	0.991
46	0.927	0.935	0.945	0.953	0.974	0.985	0.988	0.990	0.991
47	0.928	0.936	0.946	0.954	0.974	0.985	0.988	0.990	0.991
48	0.929	0.937	0.947	0.954	0.974	0.985	0.988	0.990	0.991
49	0.929	0.937	0.947	0.955	0.974	0.985	0.988	0.990	0.991
50	0.930	0.938	0.947	0.955	0.974	0.985	0.988	0.990	0.991

Anexo 6. Valores críticos de la distribución f (0,05).

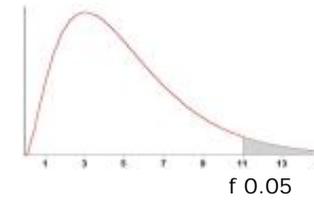
Tabla D.9: VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F (0,05)



área a la derecha del valor crítico = 0,05

Grados de libertad del Denominador	Grados de libertad del Numerador															g.d.l
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,0	243,9	244,7	245,4	245,9	1
2	18,513	19,000	19,164	19,247	19,296	19,330	19,353	19,371	19,385	19,396	19,405	19,413	19,419	19,424	19,429	2
3	10,128	9,552	9,277	9,117	9,013	8,941	8,887	8,845	8,812	8,786	8,763	8,745	8,729	8,715	8,703	3
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999	5,964	5,936	5,912	5,891	5,873	5,858	4
5	6,608	5,786	5,409	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,772	4,735	4,704	4,678	4,655	4,636	4,619	5
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099	4,060	4,027	4,000	3,976	3,956	3,938	6
7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677	3,637	3,603	3,575	3,550	3,529	3,511	7
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,687	3,581	3,500	3,438	3,388	3,347	3,313	3,284	3,259	3,237	3,218	8
9	5,117	4,256	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,230	3,179	3,137	3,102	3,073	3,048	3,025	3,006	9
10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217	3,135	3,072	3,020	2,978	2,943	2,913	2,887	2,865	2,845	10
11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095	3,012	2,948	2,896	2,854	2,818	2,788	2,761	2,739	2,719	11
12	4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996	2,913	2,849	2,796	2,753	2,717	2,687	2,660	2,637	2,617	12
13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915	2,832	2,767	2,714	2,671	2,635	2,604	2,577	2,554	2,533	13
14	4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848	2,764	2,699	2,646	2,602	2,565	2,534	2,507	2,484	2,463	14
15	4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,790	2,707	2,641	2,588	2,544	2,507	2,475	2,448	2,424	2,403	15
16	4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741	2,657	2,591	2,538	2,494	2,456	2,425	2,397	2,373	2,352	16
17	4,451	3,592	3,197	2,965	2,810	2,699	2,614	2,548	2,494	2,450	2,413	2,381	2,353	2,329	2,308	17
18	4,414	3,555	3,160	2,928	2,773	2,661	2,577	2,510	2,456	2,412	2,374	2,342	2,314	2,290	2,269	18
19	4,381	3,522	3,127	2,895	2,740	2,628	2,544	2,477	2,423	2,378	2,340	2,308	2,280	2,256	2,234	19
20	4,351	3,493	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393	2,348	2,310	2,278	2,250	2,225	2,203	20
21	4,325	3,467	3,072	2,840	2,685	2,573	2,488	2,420	2,366	2,321	2,283	2,250	2,222	2,197	2,176	21
22	4,301	3,443	3,049	2,817	2,661	2,549	2,464	2,397	2,342	2,297	2,259	2,226	2,198	2,173	2,151	22
23	4,279	3,422	3,028	2,796	2,640	2,528	2,442	2,375	2,320	2,275	2,237	2,204	2,175	2,150	2,128	23
24	4,260	3,403	3,009	2,776	2,621	2,508	2,423	2,355	2,300	2,255	2,216	2,183	2,155	2,130	2,108	24
25	4,242	3,385	2,991	2,759	2,603	2,490	2,405	2,337	2,282	2,236	2,198	2,165	2,136	2,111	2,089	25
26	4,225	3,369	2,975	2,743	2,587	2,474	2,388	2,321	2,265	2,220	2,181	2,148	2,119	2,094	2,072	26
27	4,210	3,354	2,960	2,728	2,572	2,459	2,373	2,305	2,250	2,204	2,166	2,132	2,103	2,078	2,056	27
28	4,196	3,340	2,947	2,714	2,558	2,445	2,359	2,291	2,236	2,190	2,151	2,118	2,089	2,064	2,041	28
29	4,183	3,328	2,934	2,701	2,545	2,432	2,346	2,278	2,223	2,177	2,138	2,104	2,075	2,050	2,027	29
30	4,171	3,316	2,922	2,690	2,534	2,421	2,334	2,266	2,211	2,165	2,126	2,092	2,063	2,037	2,015	30
31	4,160	3,305	2,911	2,679	2,523	2,409	2,323	2,255	2,199	2,153	2,114	2,080	2,051	2,026	2,003	31
32	4,149	3,295	2,901	2,668	2,512	2,399	2,313	2,244	2,189	2,142	2,103	2,070	2,040	2,015	1,992	32
33	4,139	3,285	2,892	2,659	2,503	2,389	2,303	2,235	2,179	2,133	2,093	2,060	2,030	2,004	1,982	33
34	4,130	3,276	2,883	2,650	2,494	2,380	2,294	2,225	2,170	2,123	2,084	2,050	2,021	1,995	1,972	34
35	4,121	3,267	2,874	2,641	2,485	2,372	2,285	2,217	2,161	2,114	2,075	2,041	2,012	1,986	1,963	35
40	4,085	3,232	2,839	2,606	2,449	2,336	2,249	2,180	2,124	2,077	2,038	2,003	1,974	1,948	1,924	40
60	4,001	3,150	2,758	2,525	2,368	2,254	2,167	2,097	2,040	1,993	1,952	1,917	1,887	1,860	1,836	60
80	3,960	3,111	2,719	2,486	2,329	2,214	2,126	2,056	1,999	1,951	1,910	1,875	1,845	1,817	1,793	80
90	3,947	3,098	2,706	2,473	2,316	2,201	2,113	2,043	1,986	1,938	1,897	1,861	1,830	1,803	1,779	90
100	3,936	3,087	2,696	2,463	2,305	2,191	2,103	2,032	1,975	1,927	1,886	1,850	1,819	1,792	1,768	100
120	3,920	3,072	2,680	2,447	2,290	2,175	2,087	2,016	1,959	1,910	1,869	1,834	1,803	1,775	1,750	120
inf.	3,841	2,996	2,605	2,372	2,214	2,099	2,010	1,938	1,880	1,831	1,789	1,752	1,720	1,692	1,666	inf.

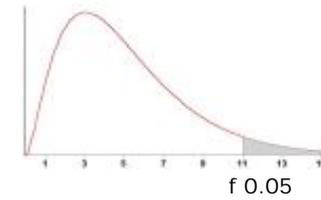
Tabla D.9: VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F (0,05)



área a la derecha del valor crítico = 0,05

Grados de libertad del Denominador	Grados de libertad del Numerador															g.d.l
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	246,5	246,9	247,3	247,7	248,0	248,3	248,6	248,8	249,1	249,3	249,5	249,6	249,8	250,0	250,1	1
2	19,433	19,437	19,440	19,443	19,446	19,448	19,450	19,452	19,454	19,456	19,457	19,459	19,460	19,461	19,462	2
3	8,692	8,683	8,675	8,667	8,660	8,654	8,648	8,643	8,639	8,634	8,630	8,626	8,623	8,620	8,617	3
4	5,844	5,832	5,821	5,811	5,803	5,795	5,787	5,781	5,774	5,769	5,763	5,759	5,754	5,750	5,746	4
5	4,604	4,590	4,579	4,568	4,558	4,549	4,541	4,534	4,527	4,521	4,515	4,510	4,505	4,500	4,496	5
6	3,922	3,908	3,896	3,884	3,874	3,865	3,856	3,849	3,841	3,835	3,829	3,823	3,818	3,813	3,808	6
7	3,494	3,480	3,467	3,455	3,445	3,435	3,426	3,418	3,410	3,404	3,397	3,391	3,386	3,381	3,376	7
8	3,202	3,187	3,173	3,161	3,150	3,140	3,131	3,123	3,115	3,108	3,102	3,095	3,090	3,084	3,079	8
9	2,989	2,974	2,960	2,948	2,936	2,926	2,917	2,908	2,900	2,893	2,886	2,880	2,874	2,869	2,864	9
10	2,828	2,812	2,798	2,785	2,774	2,764	2,754	2,745	2,737	2,730	2,723	2,716	2,710	2,705	2,700	10
11	2,701	2,685	2,671	2,658	2,646	2,636	2,626	2,617	2,609	2,601	2,594	2,588	2,582	2,576	2,570	11
12	2,599	2,583	2,568	2,555	2,544	2,533	2,523	2,514	2,505	2,498	2,491	2,484	2,478	2,472	2,466	12
13	2,515	2,499	2,484	2,471	2,459	2,448	2,438	2,429	2,420	2,412	2,405	2,398	2,392	2,386	2,380	13
14	2,445	2,428	2,413	2,400	2,388	2,377	2,367	2,357	2,349	2,341	2,334	2,326	2,320	2,314	2,308	14
15	2,385	2,368	2,353	2,340	2,328	2,316	2,306	2,297	2,288	2,280	2,272	2,265	2,259	2,253	2,247	15
16	2,333	2,317	2,302	2,288	2,276	2,264	2,254	2,244	2,235	2,227	2,220	2,212	2,206	2,200	2,194	16
17	2,289	2,272	2,257	2,243	2,230	2,219	2,208	2,199	2,190	2,181	2,174	2,167	2,160	2,154	2,148	17
18	2,250	2,233	2,217	2,203	2,191	2,179	2,168	2,159	2,150	2,141	2,134	2,126	2,119	2,113	2,107	18
19	2,215	2,198	2,182	2,168	2,155	2,144	2,133	2,123	2,114	2,106	2,098	2,090	2,084	2,077	2,071	19
20	2,184	2,167	2,151	2,137	2,124	2,112	2,102	2,092	2,082	2,074	2,066	2,059	2,052	2,045	2,039	20
21	2,156	2,139	2,123	2,109	2,096	2,084	2,073	2,063	2,054	2,045	2,037	2,030	2,023	2,016	2,010	21
22	2,131	2,114	2,098	2,084	2,071	2,059	2,048	2,038	2,028	2,020	2,012	2,004	1,997	1,990	1,984	22
23	2,109	2,091	2,075	2,061	2,048	2,036	2,025	2,014	2,005	1,996	1,988	1,981	1,973	1,967	1,961	23
24	2,088	2,070	2,054	2,040	2,027	2,015	2,003	1,993	1,984	1,975	1,967	1,959	1,952	1,945	1,939	24
25	2,069	2,051	2,035	2,021	2,007	1,995	1,984	1,974	1,964	1,955	1,947	1,939	1,932	1,926	1,919	25
26	2,052	2,034	2,018	2,003	1,990	1,978	1,966	1,956	1,946	1,938	1,929	1,921	1,914	1,907	1,901	26
27	2,036	2,018	2,002	1,987	1,974	1,961	1,950	1,940	1,930	1,921	1,913	1,905	1,898	1,891	1,884	27
28	2,021	2,003	1,987	1,972	1,959	1,946	1,935	1,924	1,915	1,906	1,897	1,889	1,882	1,875	1,869	28
29	2,007	1,989	1,973	1,958	1,945	1,932	1,921	1,910	1,901	1,891	1,883	1,875	1,868	1,861	1,854	29
30	1,995	1,976	1,960	1,945	1,932	1,919	1,908	1,897	1,887	1,878	1,870	1,862	1,854	1,847	1,841	30
31	1,983	1,965	1,948	1,933	1,920	1,907	1,896	1,885	1,875	1,866	1,857	1,849	1,842	1,835	1,828	31
32	1,972	1,953	1,937	1,922	1,908	1,896	1,884	1,873	1,864	1,854	1,846	1,838	1,830	1,823	1,817	32
33	1,961	1,943	1,926	1,911	1,898	1,885	1,873	1,863	1,853	1,844	1,835	1,827	1,819	1,812	1,806	33
34	1,952	1,933	1,917	1,902	1,888	1,875	1,863	1,853	1,843	1,833	1,825	1,817	1,809	1,802	1,795	34
35	1,942	1,924	1,907	1,892	1,878	1,866	1,854	1,843	1,833	1,824	1,815	1,807	1,799	1,792	1,786	35
40	1,904	1,885	1,868	1,853	1,839	1,826	1,814	1,803	1,793	1,783	1,775	1,766	1,759	1,751	1,744	40
60	1,815	1,796	1,778	1,763	1,748	1,735	1,722	1,711	1,700	1,690	1,681	1,672	1,664	1,656	1,649	60
80	1,772	1,752	1,734	1,718	1,703	1,689	1,677	1,665	1,654	1,644	1,634	1,626	1,617	1,609	1,602	80
90	1,757	1,737	1,720	1,703	1,688	1,675	1,662	1,650	1,639	1,629	1,619	1,610	1,601	1,593	1,586	90
100	1,746	1,726	1,708	1,691	1,676	1,663	1,650	1,638	1,627	1,616	1,607	1,598	1,589	1,581	1,573	100
120	1,728	1,709	1,690	1,674	1,659	1,645	1,632	1,620	1,608	1,598	1,588	1,579	1,570	1,562	1,554	120
inf.	1,644	1,623	1,604	1,587	1,571	1,556	1,542	1,529	1,517	1,506	1,496	1,486	1,476	1,467	1,459	inf.

Tabla D.9: VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F (0,05)



área a la derecha del valor crítico = 0,05

g.d.l	Grados de libertad del Numerador															g.d.l
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	50	60	100	120	inf.	
1	250,2	250,4	250,5	250,6	250,7	250,8	250,9	251,0	251,1	251,1	251,8	252,2	253,0	253,3	254,3	1
2	19,463	19,464	19,465	19,466	19,467	19,468	19,469	19,469	19,470	19,471	19,476	19,479	19,486	19,487	19,496	2
3	8,614	8,611	8,609	8,606	8,604	8,602	8,600	8,598	8,596	8,594	8,581	8,572	8,554	8,549	8,526	3
4	5,742	5,739	5,735	5,732	5,729	5,727	5,724	5,722	5,719	5,717	5,699	5,688	5,664	5,658	5,628	4
5	4,492	4,488	4,484	4,481	4,478	4,474	4,472	4,469	4,466	4,464	4,444	4,431	4,405	4,398	4,365	5
6	3,804	3,800	3,796	3,792	3,789	3,786	3,783	3,780	3,777	3,774	3,754	3,740	3,712	3,705	3,669	6
7	3,371	3,367	3,363	3,359	3,356	3,352	3,349	3,346	3,343	3,340	3,319	3,304	3,275	3,267	3,230	7
8	3,075	3,070	3,066	3,062	3,059	3,055	3,052	3,049	3,046	3,043	3,020	3,005	2,975	2,967	2,928	8
9	2,859	2,854	2,850	2,846	2,842	2,839	2,835	2,832	2,829	2,826	2,803	2,787	2,756	2,748	2,707	9
10	2,695	2,690	2,686	2,681	2,678	2,674	2,670	2,667	2,664	2,661	2,637	2,621	2,588	2,580	2,538	10
11	2,565	2,561	2,556	2,552	2,548	2,544	2,541	2,537	2,534	2,531	2,507	2,490	2,457	2,448	2,404	11
12	2,461	2,456	2,452	2,447	2,443	2,439	2,436	2,432	2,429	2,426	2,401	2,384	2,350	2,341	2,296	12
13	2,375	2,370	2,366	2,361	2,357	2,353	2,349	2,346	2,342	2,339	2,314	2,297	2,261	2,252	2,206	13
14	2,303	2,298	2,293	2,289	2,284	2,280	2,277	2,273	2,270	2,266	2,241	2,223	2,187	2,178	2,131	14
15	2,241	2,236	2,232	2,227	2,223	2,219	2,215	2,211	2,208	2,204	2,178	2,160	2,123	2,114	2,066	15
16	2,188	2,183	2,178	2,174	2,169	2,165	2,161	2,158	2,154	2,151	2,124	2,106	2,068	2,059	2,010	16
17	2,142	2,137	2,132	2,127	2,123	2,119	2,115	2,111	2,107	2,104	2,077	2,058	2,020	2,011	1,960	17
18	2,102	2,096	2,091	2,087	2,082	2,078	2,074	2,070	2,066	2,063	2,035	2,017	1,978	1,968	1,917	18
19	2,066	2,060	2,055	2,050	2,046	2,042	2,037	2,034	2,030	2,026	1,999	1,980	1,940	1,930	1,878	19
20	2,033	2,028	2,023	2,018	2,013	2,009	2,005	2,001	1,997	1,994	1,966	1,946	1,907	1,896	1,843	20
21	2,004	1,999	1,994	1,989	1,984	1,980	1,976	1,972	1,968	1,965	1,936	1,916	1,876	1,866	1,812	21
22	1,978	1,973	1,968	1,963	1,958	1,954	1,949	1,945	1,942	1,938	1,909	1,889	1,849	1,838	1,783	22
23	1,955	1,949	1,944	1,939	1,934	1,930	1,925	1,921	1,918	1,914	1,885	1,865	1,823	1,813	1,757	23
24	1,933	1,927	1,922	1,917	1,912	1,908	1,904	1,900	1,896	1,892	1,863	1,842	1,800	1,790	1,733	24
25	1,913	1,908	1,902	1,897	1,892	1,888	1,884	1,879	1,876	1,872	1,842	1,822	1,779	1,768	1,711	25
26	1,895	1,889	1,884	1,879	1,874	1,869	1,865	1,861	1,857	1,853	1,823	1,803	1,760	1,749	1,691	26
27	1,878	1,872	1,867	1,862	1,857	1,852	1,848	1,844	1,840	1,836	1,806	1,785	1,742	1,731	1,672	27
28	1,863	1,857	1,851	1,846	1,841	1,837	1,832	1,828	1,824	1,820	1,790	1,769	1,725	1,714	1,654	28
29	1,848	1,842	1,837	1,832	1,827	1,822	1,818	1,813	1,809	1,806	1,775	1,754	1,710	1,698	1,638	29
30	1,835	1,829	1,823	1,818	1,813	1,808	1,804	1,800	1,796	1,792	1,761	1,740	1,695	1,683	1,622	30
31	1,822	1,816	1,811	1,805	1,800	1,796	1,791	1,787	1,783	1,779	1,748	1,726	1,681	1,670	1,608	31
32	1,810	1,804	1,799	1,794	1,789	1,784	1,779	1,775	1,771	1,767	1,736	1,714	1,669	1,657	1,594	32
33	1,799	1,793	1,788	1,783	1,777	1,773	1,768	1,764	1,760	1,756	1,724	1,702	1,657	1,645	1,581	33
34	1,789	1,783	1,777	1,772	1,767	1,762	1,758	1,753	1,749	1,745	1,713	1,691	1,645	1,633	1,569	34
35	1,779	1,773	1,768	1,762	1,757	1,752	1,748	1,743	1,739	1,735	1,703	1,681	1,635	1,623	1,558	35
40	1,738	1,732	1,726	1,721	1,715	1,710	1,706	1,701	1,697	1,693	1,660	1,637	1,589	1,577	1,509	40
60	1,642	1,636	1,630	1,624	1,618	1,613	1,608	1,603	1,599	1,594	1,559	1,534	1,481	1,467	1,389	60
80	1,595	1,588	1,582	1,576	1,570	1,564	1,559	1,554	1,549	1,545	1,509	1,482	1,428	1,411	1,325	80
90	1,579	1,572	1,566	1,560	1,554	1,548	1,543	1,538	1,533	1,528	1,491	1,465	1,407	1,391	1,302	90
100	1,566	1,559	1,553	1,547	1,541	1,535	1,530	1,525	1,520	1,515	1,477	1,450	1,392	1,376	1,283	100
120	1,547	1,540	1,534	1,527	1,521	1,516	1,510	1,505	1,500	1,495	1,457	1,429	1,369	1,352	1,254	120
inf.	1,451	1,444	1,436	1,429	1,423	1,417	1,411	1,405	1,399	1,394	1,350	1,318	1,243	1,221	1,000	inf.