

Capítulo I

ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Las adiciones en el hormigón pueden provenir de naturaleza inorgánica dado que brindan mejoras al ser molidas e incorporadas en la matriz del hormigón, al contener características cementantes que mejoran las propiedades del hormigón.

El hormigón es un material que se encuentra en constante análisis, debido a que, al ser tan versátil en el área de la construcción, se requiere eficiencia en su uso y en las características que puede brindar, por tal razón es que a lo largo del tiempo ha sido analizado con la incorporación de diferentes materiales.

Las adiciones son incorporadas a la matriz del hormigón en altas cantidades, a diferencia de lo que se sucede con los aditivos, por tal razón deberán estar contempladas en la dosificación del hormigón.

Podrán utilizarse adiciones, para modificar favorablemente alguna de las propiedades del hormigón o conseguir ciertas características especiales como ser mayor resistencia o permeabilidad.

Tienen el carácter de adiciones, las escorias, cenizas volantes, ciertos polvos minerales, materiales inertes, como los colorantes, materiales no minerales, de naturaleza orgánica, tales como ciertas resinas sintéticas, etc.

Al utilizar adiciones con el hormigón, no deben sobrepasarse valores límites ya que, caso contrario, pueden resultar perjudicadas la durabilidad del hormigón o la resistencia a la compresión que esta pueda llegar a tener. (Eddyhrbs, 2010)

1.2 El Problema

Ante un incremento acelerado en las últimas décadas en cuanto refiere a construcción de vivienda e infraestructura, el sector dedicado a la fabricación del cemento aporta en gran medida a la generación de residuos.

Durante el proceso de producción, se genera principalmente un residuo de carácter sólido conocido como polvo de horno de cemento, estimando que la cantidad generada de este residuo logra alcanzar valores hasta del 3% de la cantidad total de cemento producido.

Por tanto, la disposición final de los residuos generados durante la fabricación de cemento “El Puente” se vuelve un problema a resolver, de cara a los conflictos ambientales relacionados a las emisiones de CO₂.

1.2.1.- Planteamiento

Las fábricas de cemento consideran diferentes alternativas al momento de desechar los residuos de fabricación de cemento, evaluando los impactos positivos y negativos que se plantean en cada situación y determinando la mejor disposición.

Entre las diferentes alternativas, se consideran opciones como el uso de rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto, confinamiento en celdas transitorias y de contingencia, incineración y reciclaje.

Sin embargo, la fábrica de cemento “El Puente” al momento de considerar cada opción determina que:

- No se tiene acceso a espacios aptos para hacer uso de rellenos sanitarios.
- Disponer de los residuos en botaderos a cielo abierto, podría conllevar a reacciones químicas mediante la exposición al calor o agua, generando emisiones perjudiciales para la salud.
- No se cuenta con instalaciones para realizar celdas transitorias y de contingencia.
- La incineración de residuos de fabricación de cemento, incrementaría los niveles de emisión de CO₂ que inicialmente ya posee una fábrica de cemento, constituyendo un problema en lugar de una solución.

- El reciclar los residuos de fabricación del cemento, en este caso como adición en el hormigón, se considera la solución elegida.

Lo que se busca en todo momento, es evitar una eliminación descontrolada por parte de la fábrica de cemento “El Puente”, generando no solamente un impacto negativo al ambiente, sino también un problema ante la salud.

1.2.2.- Formulación

Como solución elegida se procede a emplear los residuos de fabricación de cemento “El Puente”, específicamente el polvo de horno de cemento, el cual es formado por una reacción incompleta de la caliza y el polvo es arrastrado durante la evacuación de los gases de combustión.

Por lo tanto, es un subproducto de la producción del cemento, correspondiente al material fino transportado por el flujo de gas caliente dentro del horno durante la producción de clinker. En su composición se encuentran óxidos de calcio, silicio, hierro y aluminio entre otros

Al momento de formular el problema, se nos plantea diferentes interrogantes como ser: ¿Qué problemas se desea resolver? ¿Para qué servirá este trabajo de investigación? ¿Qué utilidad tendrá?

El problema que se desea resolver no es otro que el buscar una alternativa de uso para los residuos que se generan en la fabricación de cemento en la planta “El Puente”, mediante la incorporación en la matriz del hormigón.

Funcionando como un componente de adición, se desea disminuir el impacto que pueda tener este material residual al momento de ser desechado, mitigando los problemas ambientales que conlleva el proceso.

De tal forma, este material componente pueda adquirir utilidad dentro del rubro de la construcción, empleándolo como un reemplazo parcial del cemento.

Investigaciones recientes, como la efectuada en 2013 por el grupo de investigadores (K. Najim; Z. Mahmod y A. Atea) durante su proyecto de incorporar hasta un máximo de 20% de polvo de horno de cemento como reemplazo de aglomerante en morteros arrojo resultados satisfactorios, brindando un nuevo uso a los residuos de fabricación del cemento.

La planta de cemento “El Puente” produce al año 330.000 toneladas de cemento al año, si consideramos que en la producción se generan residuos de hasta un 3% de polvo de horno de cemento, se consideraría una cantidad importante para su disposición final y la posibilidad de emplear parte de esos residuos como una adición en la matriz de componentes del hormigón se presenta una solución factible.

Antes de incorporarla como un componente más en el hormigón, se requerirá una molienda al producto residual, dado que no presenta forma ni tamaño homogéneo, por lo que es necesario moler el material hasta una finura comparable a la del cemento, con el fin de que actúe como un material que rellena una parte de los poros generados en el hormigón, dado que un hormigón menos poroso, se considera más durable.

1.2.3.- Sistematización

El concepto de durabilidad empleado en este trabajo de investigación, está referido a la capacidad que posee el hormigón de resistir a la acción del ambiente, ataques físicos, químicos, biológicos y cualquier otro proceso que tienda a deteriorarlo.

El motivo de realizar los ensayos de velocidad de absorción y penetración de agua bajo presión está muy ligado al hecho de que investigaciones realizadas en los últimos años, determina que la permeabilidad en conjunto con la porosidad son agentes de deterioro, por tanto, mientras menor sea la relación agua/cemento, de igual forma serán menores los valores de permeabilidad y porosidad, generando velocidades menores cuando son sometidas a ataques químicos como sulfatos, iones cloruro y carbonatación.

Y tanto el ensayo de velocidad de absorción como el ensayo de penetración de agua, poseen valores que permiten verificar cuando un hormigón presenta la característica de durable, la red Durar como un manual para evaluar la durabilidad de un hormigón dicta

que velocidades de absorción menores a $5,2 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$ son equivalente a hormigones resistentes a ambientes agresivos.

A su vez la norma UNE 12390-8, determina que alturas de penetración de agua menores a 50 mm, responden de forma satisfactoria ante efectos físicos y químicos antes descritos.

Para este trabajo se ha predispuesto emplear dos variables, siendo la primera la relación agua/cemento empleando 3 valores que responden a 0,45, 0,52 y 0,60 y la segunda que corresponde a porcentajes de residuo de fabricación de cemento “El Puente”, empleando valores de 5, 10 y 15%.

Con ambas variables, se generarán 3 lotes de análisis, por cada relación agua/cemento (0,45 – 0,52 – 0,60) se analizará una muestra patrón, la cual no incluirá residuos de fabricación de cemento, mientras que para realizar una comparación con los valores estándar de la muestra patrón respectiva, se analizarán muestras que contengan 5, 10 y 15% de reemplazo de residuo por cemento.

Para el estudio de la resistencia mecánica, se realizará el análisis de resistencia a compresión mediante rotura de probetas a los 28 días con la máquina de ensayos y contemplando los criterios especificados en la norma ASTM C-39, para cada combinación de relación agua/cemento y reemplazo de residuos se hará uso de 5 probetas, contemplando un valor de 20 probetas por cada lote y un total de 60 probetas.

El estudio mecánico, permite determinar los efectos que produce el reemplazo parcial de cemento por residuos de fabricación de cemento (Polvo de horno de cemento), lo cual puede repercutir en una disminución o aumento de resistencia a la compresión, el cual es un valor importante al momento de evaluar el uso de los residuos en el hormigón.

Para un estudio físico relacionado a la permeabilidad de las muestras, se realizará los ensayos de velocidad de absorción siguiendo los lineamientos descritos en la norma ASTM 1585-04 y penetración de agua bajo presión mediante la norma UNE 12390-8, contemplando 3 muestras para cada combinación de variables (Relación agua/cemento – Reemplazo de residuos de fabricación de cemento “El Puente”), por lo tanto, se tendrán 12 muestras por cada lote y un total de 36 muestras para cada ensayo.

El agua al ser considerado el principal agente de deterioro en el hormigón, al estar ligado a los ataques físicos y químicos que se suscitan en la estructura del mismo, requiere un especial análisis respecto del flujo que se produce en el interior del hormigón mediante la porosidad y permeabilidad, por lo cual es imperativo controlar estos parámetros para definir una buena durabilidad ante efectos como el ataque de sulfatos, cloruros, carbonatación, hielo y deshielo, calor de hidratación y cavitación.

1.3.- Objetivos de la Investigación

1.3.1.- General

- ❖ Analizar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas del hormigón sustituyendo en diferentes porcentajes el volumen de cemento por residuos de fabricación de cemento empleando diferentes relaciones agua/cemento.

1.3.2.- Específicos

- Determinar la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días.
- Evaluar la incidencia del uso de residuos de fabricación de cemento en la velocidad de absorción del hormigón.
- Estudiar el nivel de penetración de agua bajo presión en el hormigón.
- Comparar los resultados obtenidos en muestras con residuos de fabricación de cemento y muestras convencionales.

1.4.- Justificación

El presente trabajo busca profundizar y enfatizar ciertas características aprendidas en materias como “Tecnología del Hormigón (CIV 371)” y “Hormigón Armado I (CIV 411)”, donde se analizó las propiedades del hormigón y las características que este presenta como material de construcción, analizando al hormigón con la adición de residuos de la fabricación del cemento “El Puente” y las características que presente en materia de durabilidad (Mediante la permeabilidad de las muestras respecto de los ensayos de velocidad de absorción y penetración de agua bajo presión) y resistencia a la compresión (Mediante rotura de probetas a los 28 días, como un parámetro para evaluar su resistencia mecánica con la incorporación de residuos de fabricación de cemento “El Puente”).

Al emplear los residuos de la fabricación de cemento como adición en el hormigón, se pretende generar una solución medio ambiental respecto a la disposición final que tengan dichos residuos y analizar el cómo interviene en la matriz del hormigón, siendo importante la repercusión en la durabilidad del mismo bajo el criterio que un hormigón que permita un menor flujo de agua en su interior es más durable ante ataques que tienen la permeabilidad como principal agente de deterioro, al permitir un mayor impacto de ataques químicos y físicos, como ser el ataque de sulfuros, ion cloruro, carbonatación, hielo y deshielo.

La durabilidad de los hormigones es un criterio que empieza a tomar mayor importancia en estos tiempos, por lo tanto, los avances e investigaciones al respecto están en aumento, considerando las diferentes variables que intervienen en su análisis, muchas de ellas referidas al agua y la permeabilidad como agentes de deterioro, por tanto, es un aspecto que deberá tomarse en cuenta a lo largo de toda la investigación.

1.5.- Alcance

Para el desarrollo de esta investigación es necesario evaluar las características del hormigón con el reemplazo parcial de cemento por residuos de fabricación de cemento “El Puente”, tomando en cuenta la durabilidad, por lo que será necesario controlar la relación agua/cemento en las probetas a realizar empleando variaciones de 0,45, 0,52 y 0,60, dado que un hormigón será más denso y por ende más durable, con una baja concentración de agua, lo cual también controlara los niveles de permeabilidad en el hormigón, reduciendo así mismo la cantidad de poros que pudiera generarse.

Al analizar probetas de hormigón con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por residuos de fabricación del cemento, deberá controlarse ciertos aspectos para no modificar las características de la probeta analizada respecto de la probeta patrón, como ser; los agregados a emplear y el agua utilizada, dado que son valores que podrían afectar los resultados a obtener.

Al analizar las probetas y determinar que los niveles de penetración de agua se encuentran enmarcados dentro de los límites que maneja la prueba estandarizada, se

obtiene un parámetro importante cuando se habla de durabilidad de hormigones, puesto que la permeabilidad se encuentra bastante ligada a los poros.

1.5.1.- Hipótesis

La incorporación de residuos de fabricación de cemento como sustituto parcial del cemento en una matriz de hormigón en los porcentajes de 5,10 y 15% dará como resultado un material de construcción con parámetros de calidad semejantes a la de un hormigón portland convencional en cuanto a resistencia y durabilidad.

1.6.- Limitaciones

Para el desarrollo de la investigación, se ha considerado el uso de tres ensayos en el análisis de las características, siendo estos, la prueba de resistencia a la compresión, ensayo de velocidad de absorción o sortividad y penetración de agua bajo presión.

Para realizar la investigación se ha definido usar tres diferentes relaciones agua/cemento, como variable durante la investigación, siendo las mismas de 0,45 ; 0,52 y 0,60 en el uso de probetas, las cuales contendrán diferentes porcentajes de residuos de fabricación del cemento, sustituyendo parcialmente al cemento como aglomerante, para el estudio se ha previsto emplear porcentajes de: 5, 10 y 15 por ciento, empleando 5 probetas para cada relación agua/cemento a emplear en el caso de pruebas de resistencia a la compresión, además de las probetas patrón, las cuales servirán de referencia en el análisis de resultados.

A su vez se emplearán tres probetas para cada combinación de relación agua/cemento y reemplazo de residuos de fabricación de cemento para el estudio de velocidad de absorción o sortividad contemplado en la norma ASTM C1585 – 04.

Finalmente, para el ensayo de penetración de agua bajo presión, se hará uso nuevamente de tres probetas para cada combinación de relación agua/cemento y reemplazo de residuo de fabricación de cemento.

1.6.1.- Limitaciones geográficas

El presente estudio se limita geográficamente a la ciudad de Tarija, debido a que los componentes del hormigón serán obtenidos en la misma, en cuanto refiere a agregados, cemento, agua y por supuesto los residuos de fabricación de cemento procedentes de la planta de cemento “El Puente”.

1.6.2.- Limitaciones temporales

La limitación temporal en este trabajo de investigación corresponde a la fecha en que se realice un trabajo similar, analizando nuevamente los efectos generados en el hormigón con la incorporación de residuos de fabricación de cemento “El Puente”, validando o contrastando los resultados obtenidos en esta investigación.

Capítulo II

MARCO TEORICO

2.1.- El hormigón como material de construcción

El uso extenso del concreto, es la facilidad con la que los elementos de concreto estructural pueden ser moldeados para dar una variedad de formas y tamaños. Esto se debe a que el concreto fresco tiene una consistencia plástica, lo que permite al material fluir dentro de diferentes elementos, como el caso de elementos prefabricados. (Mehta & Monteiro, 1998)

La popularidad del concreto entre los ingenieros es que generalmente constituye el material más económico y rápidamente disponible en las obras. Los principales ingredientes para producir el concreto (Cemento portland y agregados) son relativamente económicos y comúnmente disponibles en la mayor parte del mundo. (Mehta & Monteiro, 1998)

Sin embargo, el hormigón, puede contener entre sus componentes, la incorporación de diferentes adiciones, buscando enriquecer las características iniciales que este presenta, desde un punto de vista mecánico como la resistencia o incluso hasta tocar aspectos como la durabilidad.

2.1.1.- Componentes del hormigón

El hormigón es un material compuesto que consiste esencialmente en un medio conglomerante dentro del cual se hallan ahogadas partículas o fragmentos de agregados. En el hormigón de cemento hidráulico, el medio conglomerante está formado por una mezcla de hormigón hidráulico y agua. (Mehta & Monteiro, 1998, p. 3)

Kumar Mehta y Paulo Monteiro nos brindan una definición en cuanto a términos empleados para agregado fino y grueso que responde a lo siguiente:

El termino agregado grueso, se refiere a las partículas de agregado mayores a 4.75 mm (Malla N° 4) y el termino agregado fino, se refiere a las partículas de agregado menores de 4.75 mm pero mayores de 75 μm (Malla N° 200). La grava es el agregado grueso que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesamiento de conglomerado de adherencia débil.

El termino arena es comúnmente utilizado para el agregado fino que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesado de piedra caliza deleznable. La piedra triturada es el producto que resulta del triturado industrial de piedras bola, de rocas, o de grandes pedruscos (1998, p. 3).

El cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. Esta definición comprende una gran variedad de materiales cementantes (Neville, 2013).

2.1.2.- Componente cemento

El nombre de cemento portland, concebido originalmente debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento endurecido y la piedra de portland (una caliza obtenida en una cantera de Dorset), se ha conservado en todo de mundo hasta nuestros días para describir un cemento que se obtiene al mezclar minuciosamente materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina, u óxidos de fierro, quemándolos a una temperatura de formación de clinker y por medio de la molienda el clinker resultante (Neville, 2013).

2.1.2.1.- Fabricación del cemento portland

Por la definición de cemento portland dada anteriormente, se puede observar que está compuesto principalmente de materiales calcáreos tales como caliza, y por alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla o pizarra. También se utiliza la marga, que es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos. La materia prima para la fabricación del cemento portland se encuentra en casi todos los países, y las fábricas de cemento operan en todo el mundo.

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclar la minuciosamente en ciertas proporciones y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión a una temperatura de aproximadamente 1.450 °C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como clinker. El clinker se enfría y se tritura hasta obtener un polvo fino, después se adiciona un poco de

yeso, y el producto resultante es el cemento portland comercial que tanto se usa en todo el mundo (Neville, 2013).

2.1.2.2.- Composición química del cemento portland

Hemos visto que las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento portland consisten principalmente en cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar.

Se suelen considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento; empleando la siguiente nomenclatura: $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$. Análogamente, el H_2O del cemento hidratado, se indica por una H y SO_3 por S.

En realidad, los silicatos que se encuentran en el cemento no son compuestos puros, pues contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Estos óxidos tienen efectos importantes en los arreglos atómicos, las formas cristalinas y las propiedades hidráulicas de los silicatos (Neville, 2013).

Tabla 2.1: Compuestos principales del cemento portland.

Compuestos principales del cemento portland		
Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fuente: Adaptada de Tecnología del Concreto, (Neville, 2013)

Además de los compuestos principales citados en la tabla 2.1, existen algunos compuestos menores tales como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O y Na_2O , que generalmente no

sobrepasan de un pequeño porcentaje del peso de cemento. Dos de los compuestos menores revisten interés: los óxidos de sodio y potasio, Na_2O y K_2O respectivamente, conocidos como álcalis (aunque en el cemento existen también otros álcalis) (Neville, 2013).

2.1.2.3.- Hidratación del cemento

El cemento portland anhidro no se une a la arena y a la grava; adquiere la propiedad adhesiva solamente cuando se lo mezcla con el agua. Esto es porque la reacción química del cemento con el agua, llamada comúnmente hidratación del cemento, rinde productos que poseen características de fraguado y endurecimiento (Mehta & Monteiro, 1998).

Según Neville los principales hidratos pueden clasificarse, a grandes rasgos, en hidratos de silicato de calcio e hidrato de aluminato tricálcico. Se cree que el C_4AF se hidrata en hidrato de aluminato tricálcico y en una fase amorfa, probablemente $\text{CaO}\cdot\text{F}_2\text{O}_3$. Es posible también que haya algo de Fe_2O_3 en la solución sólida del hidrato de aluminato tricálcico (2013).

El desarrollo del proceso de hidratación del cemento puede determinarse por diferentes métodos, como la medida de:

- La cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la pasta.
- El calor cedido por la hidratación.
- La densidad específica de la pasta.
- La cantidad de agua químicamente combinada.
- La cantidad de cemento deshidratado (utilizando análisis de rayos X cuantitativo)
- También indirectamente, de la resistencia de la pasta hidratada.

2.1.2.4.- Agua retenida en la pasta de cemento de cemento hidratado

En repetidas ocasiones se ha mencionado la presencia de agua en el cemento hidratado. La pasta de cemento es verdaderamente higroscópica, debido al carácter hidrófilo del cemento, unido a la presencia de poros ultramicroscópicos.

El contenido real de agua de la pasta depende de la humedad del ambiente. En particular, los poros capilares, debido a su tamaño comparativamente grande, se vacían

cuando la humedad desciende abajo de 45 por ciento, pero el agua es adsorbida en los poros de gel incluso a humedad ambiente muy baja.

No existe ninguna técnica para determinar cómo se distribuye el agua entre estos diferentes estados, tampoco es fácil predecir esas divisiones a partir de consideraciones teóricas, puesto que la energía de enlace del agua combinada en el hidrato es del mismo orden de magnitud que la energía de enlace del agua adsorbida. Sin embargo, investigaciones efectuadas con resonancia magnética nuclear han sugerido que el agua de gel tiene la misma energía de enlace que el agua entre capas de algunas arcillas expansivas; por lo tanto, el agua de gel puede estar perfectamente en forma de entre capas (Neville, 2013).

2.1.2.5.- La estructura porosa del hormigón

El hormigón es un material compuesto constituido por una fase sólida (cemento hidratado, cemento anhidro y agregados) y un espacio poroso o volumen de vacíos, que representan entre el 8% y el 25% del volumen total.

A partir del contacto inicial entre el agua y cemento, comienza una gran actividad química, caracterizada por la disolución de los compuestos en sus constituyentes iónicos, con una posterior saturación y precipitación de los hidratos en disolución.

Se forman así los llamados “productos de hidratación”, entre los cuales el C-S-H (Silicato de calcio hidratado) y el CH (Hidróxido de calcio) constituyen los compuestos más importantes. Los primeros ocupan entre el 60% del volumen de la pasta, mientras que los segundos entre el 20 y 25%.

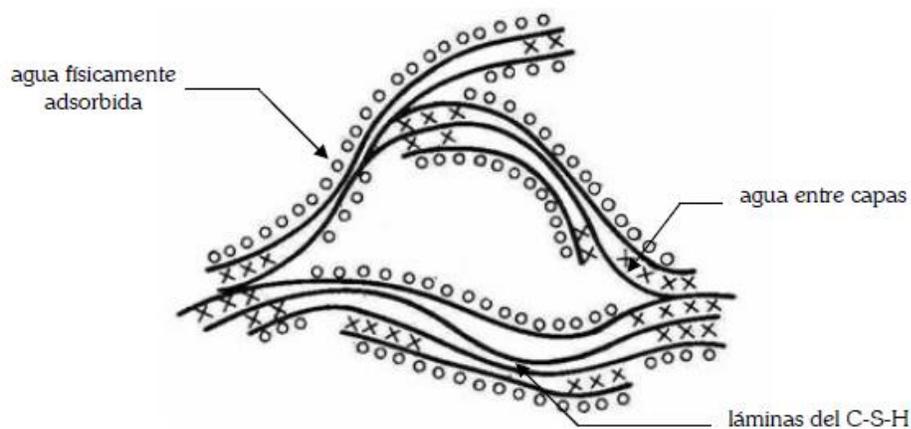
En la pasta de cemento hidratada además existe agua, la cual puede clasificarse según la facilidad con la que puede ser removida del sistema.

La figura 2.1 presenta un esquema del modelo del C-S-H y del agua asociada a su estructura, propuesto por Feldman y Sereda (1968).

El agua químicamente combinada o agua no evaporable, es la que forma parte de la estructura de los compuestos hidratados, no es posible extraerla por un simple secado,

sino que sólo puede ser removida al descomponerse el compuesto mediante calentamiento (Taus, 2010).

Figura 2.1: Modelo del C-S-H.



Fuente: Adaptado de Feldman y Sereda, 1968

2.1.3.- Componente agregado

Porque al menos tres cuartas partes del volumen del hormigón están ocupadas por agregado, no es de extrañar que la calidad de éste sea de suma importancia. Los agregados no sólo pueden limitar la resistencia del hormigón, puesto que agregados débiles no pueden constituir un hormigón resistente, sino que además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del hormigón (Mehta & Monteiro, 1998).

2.1.3.1.- Porosidad y absorción del agregado

Al hablar de la densidad de los agregados, se hace énfasis en la presencia de los poros internos y, de hecho, las características de dichos poros son muy importantes en el estudio de sus propiedades. La porosidad de los agregados, su permeabilidad y absorción

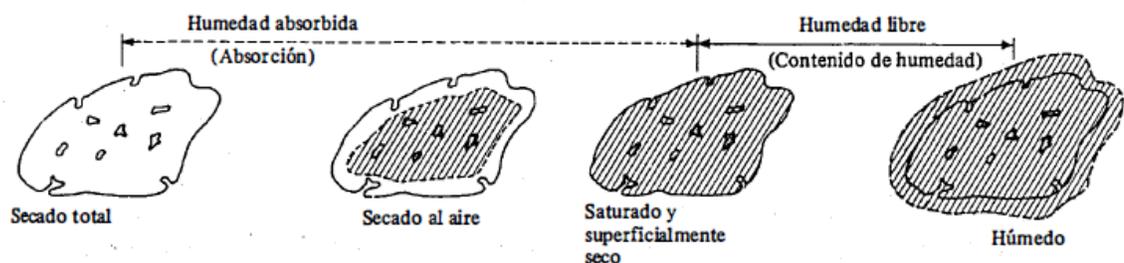
influyen en las propiedades de los agregados tales como la adherencia entre éste y la pasta de cemento hidratada, en la resistencia del concreto a la congelación y al deshielo, así como su estabilidad química y en la resistencia a la abrasión, la densidad aparente de los agregados depende también de la porosidad y, como consecuencia de esto, se ve afectado el rendimiento del hormigón para determinada masa del agregado.

Algunos de los poros del agregado se encuentran completamente dentro del sólido, mientras otros expuestos a la superficie de la partícula. Debido a su viscosidad, la pasta de cemento no puede penetrar a gran profundidad en los poros menos grandes; por lo tanto, es el volumen bruto de la partícula el que se considera como sólido para propósitos de cálculo del contenido de agregado en el concreto. Sin embargo, el agua puede penetrar en los poros y la tasa de penetración dependerá de su tamaño, continuidad y volumen total, puesto que el agregado representa aproximadamente tres cuartas partes del volumen del hormigón, está claro que la porosidad del agregado contribuye materialmente a la porosidad total del concreto.

Cuando todos los poros del agregado están llenos, se dice que éste está saturado y superficialmente seco. Si se deja que un agregado en esas condiciones quede expuesto al aire seco, por ejemplo, en el laboratorio, parte del agua contenida en los poros se evaporará y el agregado ya no estará saturado, sino secado al aire. El secado prolongado en un horno reduce aún más el contenido de agua en el agregado y, cuando ya no queda nada de humedad, se dice que el agregado está seco con masa constante. La figura 2.2 muestra esquemáticamente las diversas etapas (Neville, 2013).

En la extrema derecha de la figura 2.2 el agregado contiene humedad superficial y su color es más oscuro.

Figura 2.2: Representación diagramática de la humedad en el agregado.



Fuente: Extraído de Tecnología del Concreto (Neville, 2013).

Aunque no existe una relación clara entre la resistencia del concreto y la absorción de agua del agregado utilizado, los poros de la superficie de la partícula afectan la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento y, por lo tanto, pueden ejercer cierta influencia en la resistencia del concreto.

2.1.4.- Calidad del agua de mezclado

La calidad del agua también desempeña un papel importante: las impurezas del agua pueden interferir con el fraguado del cemento, pueden afectar adversamente la resistencia del concreto o causar manchas en su superficie, y también pueden conducir a la corrosión del refuerzo. Por estas razones, se debería tomar en cuenta la conveniencia del agua para mezclado y los propósitos del curado. Se debe distinguir con claridad entre la calidad del agua de mezclado y el ataque al concreto endurecido por aguas agresivas. En verdad, algunas aguas que afectan adversamente al concreto endurecido pueden ser inofensivas o hasta benéficas al emplearlas en el mezclado (Neville, 2013).

2.2.- Adiciones en el hormigón

De una forma un tanto simplista se ha tratado a veces de clasificar las adiciones al clínker en activas e inertes y, sobre todo estas últimas, en nocivas y no nocivas, sin especificar en qué aspectos son una cosa u otra, y sin definir adecuadamente, o cuando menos sin establecer criterios cualitativos y cuantitativos claros ni límites entre ellas.

Se ha querido considerar activas aquéllas que lo son en un aspecto químico fácilmente explicable y comprensible, e inertes en otras, aun cuando está comprobado desde antiguo que algunas de estas otras pueden ejercer una acción de tipo físico-mecánico.

Entre las adiciones consideradas sin discrepancias como químicamente activas figuran las escorias básicas granuladas de horno alto, con propiedades hidráulicas latentes o potenciales, las cuales se manifiestan por sí mismas y se desarrollan por activación alcalina y/o sulfática; y también las puzolanas naturales y artificiales (cenizas volantes y arcillas activadas), las cuales fijan cal a la temperatura ordinaria para formar compuestos hidráulicos que se suman a los producidos por el clínker.

Entre las adiciones impropriamente consideradas como inertes venían figurando (ahora ya no) los llamados 'fillers', y en particular los de naturaleza caliza (Calleja, 1983).

2.2.1.- La molienda conjunta o por separado de clinker y adiciones

En efecto, las partículas de los materiales más duros actúan como "elementos moledores" o "de refino" de las partículas de los materiales más blandos, con lo cual se distancian aún más los tamaños de ambos materiales, quedando bastante más grueso el más duro y mucho más fino el más blando.

Dentro de ciertos límites esto es, como se ha visto, lo adecuado cuando el material más duro es el clinker y el más blando la adición (filler calizo, puzolanas y cenizas volantes (en general), y tal vez alguna escoria); pero es totalmente inadecuado cuando las adiciones, idóneas o no (otras escorias, ofitas y basaltos, respectivamente), son más duras que el clinker.

Por todo ello se ha considerado la conveniencia de moler por separado los componentes de los cementos, al menos en algunos casos, y así se ha llegado a la conclusión de que, para adiciones de puzolanas, de más fácil molturación que el clinker, es aconsejable la molienda conjunta; mientras que, para adiciones de escorias muy duras, más difíciles de moler que el clinker, se recomienda la molienda por separado, y tanto más cuanto mayor sea la proporción de escoria añadida en el cemento (Calleja, 1983).

2.3.- Durabilidad del hormigón

Una larga vida de servicio es considerada sinónimo de durabilidad. Puesto que la durabilidad es un grupo de condiciones dadas no necesariamente significa durabilidad en otras condiciones, se acostumbra incluir esa referencia general al medio ambiente cuando se define la durabilidad.

Según el comité ACI, la durabilidad del concreto de cemento portland se define como su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, es decir, el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio cuando se exponga a su medio ambiente (Mehta & Monteiro, 1998).

Había una suposición de que "el hormigón resistente es hormigón durable", las únicas consideraciones especiales eran los efectos de la alternancia de congelación y deshielo y algunas formas de ataque químico. Ahora se sabe que, para muchas condiciones de exposición de las estructuras de hormigón, ambas propiedades, resistencia y durabilidad, se han de considerar explícitamente en la etapa de diseño. Se hace hincapié en la palabra "ambas", porque sería una equivocación reemplazar el énfasis exagerado en la resistencia por el énfasis exagerado en la durabilidad (Neville, 2013).

2.3.1.- Causas de la durabilidad inadecuada

La durabilidad inadecuada se manifiesta en sí misma por el deterioro, que puede ser el producto ya sea de factores externos o de causas internas dentro del hormigón mismo. Las acciones pueden ser físicas, químicas o mecánicas. El daño mecánico es causado por impacto, abrasión, erosión o cavitación.

Las causas químicas del deterioro incluyen las reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato, el ataque externo ocurre principalmente a través de la acción de iones agresivos tales como cloruros, sulfatos, o de dióxido de carbono, además de muchos líquidos y gases naturales o industriales. Las acciones que dañan pueden ser de diversas clases, y pueden ser directas o indirectas.

Las causas físicas del deterioro incluyen los efectos de la alta temperatura o de las diferencias de expansión térmica del agregado y de la pasta de cemento endurecida. Una causa importante de daño es la congelación y deshielos alternados y la acción asociada de sales para descongelar

Se deberá observar que los procesos físicos y químicos del deterioro actúan de una manera sinérgica. En esta etapa, vale la pena notar que el deterioro del concreto raramente es producto de una causa aislada: el concreto puede ser con frecuencia satisfactorio a pesar de algunas características inconvenientes, pero, con un elemento adicional adverso, puede ocurrir el daño.

Por esta razón, a veces es difícil asignar el deterioro a algún elemento particular, pero la calidad del concreto, en el sentido amplio de la palabra, aunque con una referencia especial a la permeabilidad, casi siempre entra en el cuadro. Realmente, con la excepción

del daño mecánico, todas las influencias adversas sobre la durabilidad comprenden el transporte de fluidos a través del concreto. Por esta razón, la consideración de la durabilidad requiere una comprensión de los fenómenos involucrados (Neville, 2013).

2.3.2.1.- Influencia del sistema de poros

El aspecto de la estructura de la pasta de cemento endurecido que tiene importancia respecto de la permeabilidad, es la naturaleza del sistema de poros dentro del volumen de la pasta de cemento endurecido y también en la zona cerca de la interface entre la pasta de cemento endurecido y el agregado.

Por estas razones, se espera que la zona de interface contribuya significativamente a la permeabilidad del concreto.

Sin embargo, Larbi (1993) halló que, a pesar de la mayor porosidad de la zona de interface la permeabilidad del concreto se controla mediante el volumen de la pasta de cemento endurecido, la cual es la única fase continua del concreto.

El soporte de la opinión de Larbi lo da el hecho de que la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido no es inferior que la del concreto hecho con una pasta de cemento similar. Sin embargo, también, es importante para el hormigón, el hecho de que cualquier movimiento de fluidos ha de seguir una trayectoria más larga y más tortuosa por la presencia del agregado, el que también reduce el área efectiva para el flujo (Neville, 2013).

2.3.2.2.- Flujo y permeabilidad

Por causa de la existencia de poros de diferentes clases, de los cuales algunos contribuyen a la permeabilidad y otros no, es importante distinguir entre porosidad y permeabilidad.

La porosidad es una medida de la proporción del volumen total del concreto ocupado por poros, y se acostumbra expresarla en porcentaje. Si la porosidad es alta y los poros están interconectados, éstos contribuyen al transporte de los fluidos a través del concreto, de manera que su permeabilidad es también alta.

Por otro lado, si los poros son discontinuos o inefectivos de otra manera con respecto al transporte, entonces la permeabilidad del concreto es baja, aun si su porosidad es alta.

En lo que corresponde a la facilidad de movimiento de los fluidos a través del concreto, llamada libremente permeabilidad hasta ahora, se deberán distinguir tres mecanismos.

La permeabilidad se refiere al flujo sujeto a un diferencial de presión. Difusión es el proceso en el cual el fluido se mueve sujeto a un diferencial en concentración; la propiedad importante del concreto es la difusividad. Se pueden difundir gases a través de un espacio lleno de agua o a través de un espacio lleno de aire, pero, en el primer caso, el proceso es de 10^4 a 10^5 veces más lento que en el último.

La absorción es el resultado del movimiento capilar en los poros del concreto que están abiertos al medio ambiente. Se sigue que puede ocurrir acción capilar sólo en concreto parcialmente seco, no hay absorción de agua en el hormigón completamente seco o en hormigón saturado (Neville, 2013).

2.3.2.3.- Absorción

El volumen de espacio de poros en el concreto, a diferencia de la facilidad con la cual un fluido puede penetrarlo, se mide por la absorción; las dos cantidades no están relacionadas necesariamente. Se acostumbra medir la absorción secando un espécimen hasta una masa constante, sumergiéndolo en el agua y midiendo el aumento de masa como un porcentaje de la masa seca.

Se pueden emplear varios procedimientos, y se obtienen resultados muy diferentes, una razón para esta variación en los valores de absorción es que, en un extremo, el secado a temperatura ordinaria puede ser ineficaz para remover toda el agua; por el otro lado, el secado a altas temperaturas puede remover algo del agua combinada. Por lo tanto, la absorción no se puede utilizar como una medida de la calidad del hormigón, pero casi todos los hormigones buenos tienen una absorción muy abajo de 10 por ciento por masa; si se va a calcular el volumen ocupado por el agua, se necesita tomar en cuenta la diferencia en el peso específico del agua y del hormigón (Neville, 2013).

2.4.- Absorción capilar

Dadas las características del sistema de poros de la estructura de la pasta de cemento endurecida, los fenómenos capilares tienen una influencia significativa en los mecanismos de transporte. La absorción capilar es el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido y la determinación de absorción capilar constituye una herramienta confiable para caracterizar la estructura de poros en forma comparativa (Neville, 2013).

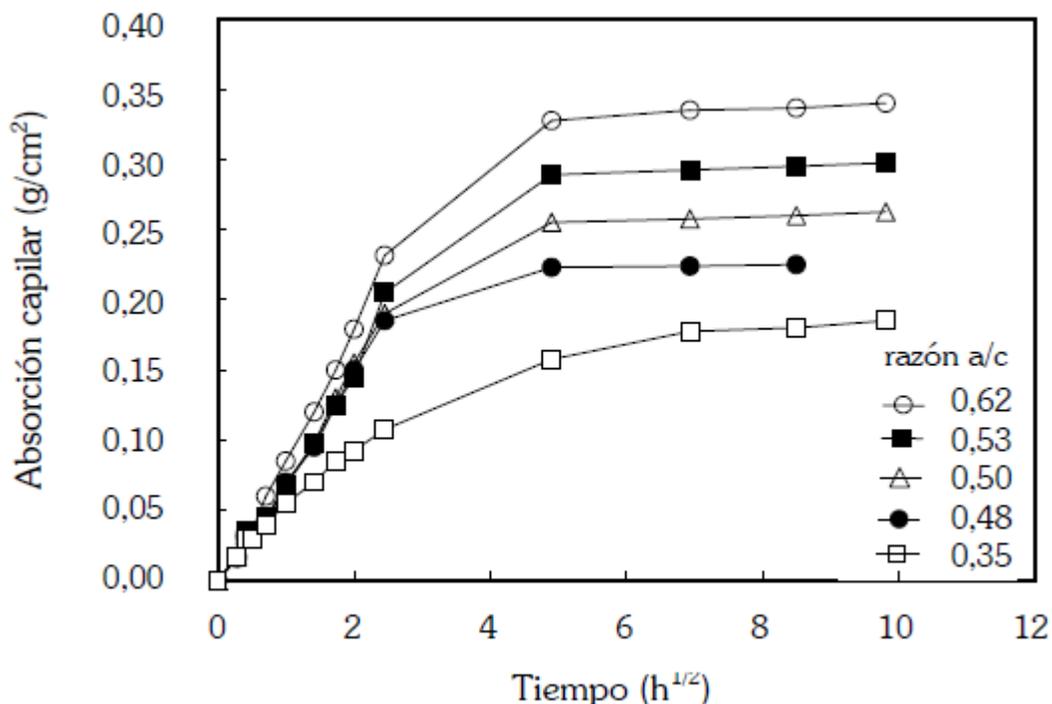
2.5.- Variación de la relación agua/cemento

La relación agua/cemento es considerada como uno de los parámetros más importantes cuando se habla de durabilidad en estructuras de hormigón armado. Dado que la capilaridad y absorción de agua se ven fuertemente correlacionadas con la misma, tomando en cuenta que una relación agua/cemento elevada permitirá un mayor flujo, lo cual es considerado perjudicial en un ambiente agresivo.

En la figura 3.3, se puede observar que a medida que la relación agua/cemento aumenta, la gráfica que muestra el comportamiento de absorción tiende a sufrir un cambio abrupto y la capacidad de absorción capilar crece (Menéndez, González, & Irassar, 2003).

La velocidad de penetración del agua aumenta debido a la porosidad interconectada del hormigón, dado que hormigones con un buen curado presentaron una capacidad de succión proporcional a la relación agua/cemento.

Figura 2.3: Influencia de la relación agua/cemento sobre la absorción capilar



(Adaptado de Gonzáles et al., 2003).

Se determinó un incremento en la velocidad de absorción al aumentar la relación agua/cemento en hormigones con distintas proporciones de cemento y agua, de igual forma se evidenció un aumento en la resistencia y disminución de la succión capilar en casos cuando el volumen de pasta disminuía (Georgiou & Kolias, 2005).

De igual forma se encontró que la absorción incrementaba en forma lineal a medida que el contenido de pasta aumentaba, lo cual indicaba que la pasta tiene mayor porosidad que los agregados y tiene un aporte mayor en cuanto refiere a absorción de agua.

2.6.- Uso de adiciones en el análisis de absorción

La influencia del empleo de adiciones minerales sobre el mecanismo de transporte por absorción capilar depende entre otros factores de sus características intrínsecas, del porcentaje de reemplazo, del tipo y duración del curado, y del pre acondicionamiento de

las muestras (más específicamente de la temperatura de secado). Por ello resulta necesaria una evaluación exhaustiva de cada caso en particular (Taus, 2010).

Diferentes autores han estudiado anteriormente el comportamiento que presentaba el hormigón respecto a la succión capilar o absorción, cuando en la matriz de componentes se encontraba incorporado un tipo de adición o en casos especiales el uso de diversas adiciones en un mismo hormigón.

El empleo de humo de sílice dentro de la matriz de componentes del hormigón había sido estudiado en proporciones del 10% y mayores, en los cuales se notaba una mejoría en cuanto refiere a la succión capilar, respecto a muestras patrones, diferentes veredictos fueron planteados, sin embargo, se determinó que la formación de hidratos de silicato de calcio adicionales durante las reacciones ante la puzolana fue la causa (Bardella, Barbosa, & Camarini, 2005).

En hormigones con incorporaciones del 70% de escoria granulada y 20% de ceniza volante, se encontró que mostraban una mejoría importante en lo respecta a la absorción, notando una reducción en el flujo al finalizar el estudio, determinando de esta forma que las adiciones minerales son una forma eficiente de mejorar las condiciones del hormigón, siempre y cuando las mismas sean en proporciones adecuadas y cumplan los parámetros establecidos en normas (Martins, Isaía, & Gastaldini, 2005).

La ceniza volante ha sido estudiada por Mangat y Khatib incorporando una cantidad del 22% de ceniza volante en reemplazo parcial del cemento, determinando que no se mostró una influencia determinante en lo que respecta al campo de absorción, en tanto que reemplazos parciales de 9% de humo de sílice presentaron valores de sortividad mayores que muestras patrón que no contenían ningún tipo de adición, debido a que los poros interconectados poseían mayor tamaño. De igual forma se contempló el uso de humo de sílice en cantidades similares, demostrando mediante estudios de los poros mediante incorporación de mercurio que los poros habían aumentado (Mangat & Khatib, 1995).

2.7.- El residuo de fabricación de cemento como adición

Como consideración inicial, habrá que acotar que a lo largo del tiempo el hormigón ha sido un material bastante analizado tanto en su morfología, características y esto ha dado lugar a buscar su optimización al encontrar nuevas alternativas de materia prima.

Figura 2.4: Polvo de horno de cemento “El Puente”



El empleo de adiciones ha dado lugar a experimentar ampliamente con el hormigón y su matriz de componentes, generando reemplazos parciales y en ciertos casos totales, tanto de agregado fino como grueso y el material aglomerante como es el cemento, buscando mejorar características de resistencia, trabajabilidad, durabilidad y comportamiento ante ambientes especiales.

El mecanismo por el cual la reacción puzolánica ejerce un efecto benéfico en las propiedades del hormigón permanece el mismo, independientemente de si un material puzolánico ha sido agregado al hormigón en la forma de un aditivo mineral o como un componente de los cementos portland mezclados.

El principal componente del cemento es el Clinker, este material se produce a partir de materias primas naturales, como la caliza y la arcilla, que se muelen, homogeneizan y se introducen en un horno rotatorio, donde se cuecen a una temperatura de 1450°C, necesaria para formar el nuevo compuesto. Los principales componentes del clinker son los óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro.

Posteriormente, al clinker se le añade yeso y otros materiales (escoria de alto horno, cenizas volantes, puzolanas, caliza, etc...) y conjuntamente se trituran en un molino hasta formar un polvo fino: el cemento (Cembureau, 2017).

El coprocesado de residuos en la industria cementera facilita la posibilidad de alcanzar un máximo de sustitución de materiales no renovables. Los tipos de residuos que pueden usarse en una planta cementera varían en función de cada instalación.

La que nos interesa en esta investigación es aquella materia prima que contenga componentes minerales adecuados para la producción de clinker o reemplazar parcialmente al cemento como aglomerante.

Dado que, durante el proceso de fabricación del cemento, existe materia residual, material que tras ser desechado genera emisiones de CO₂, es importante analizar la viabilidad de emplear dicho material para la elaboración de hormigón, empleando una finura igual o menor a la del cemento para lograr un porcentaje menor de poros y por ende lograr valores menores de absorción o en el caso de que no sea posible, en qué porcentaje ha influido negativamente la incorporación de residuos de fabricación del cemento (Cembureau, 2017).

2.8.- Análisis de la velocidad de absorción

El estudio del movimiento de un líquido por capilaridad en materiales porosos basado en un análisis puramente teórico del fenómeno, conduce a expresiones que permiten el cálculo de la altura del perfil de penetración y de la velocidad de ascensión del líquido en la muestra de ensayo.

Sin embargo, dichas expresiones suponen varias hipótesis simplificadoras las cuales se alejan de las condiciones reales o no contemplan ciertos aspectos tales como las características tecnológicas del material ensayado, su estructura porosa, en lo que hace al

tamaño y distribución de poros, su estado de humedad inicial y las condiciones medioambientales, entre las más importantes (Taus, 2010).

Por ello, para obtener con cierta confiabilidad los parámetros que representan al fenómeno estudiado, se requieren de técnicas experimentales cuyos resultados se sustenten en una base empírica y que contemplen los aspectos antes mencionados.

Existen varias técnicas que permiten cuantificar el movimiento de agua por capilaridad. Sin embargo, algunas de las metodologías de ensayo requieren equipamientos especiales de costosa adquisición, sumado al hecho de que por tratarse de técnicas muy particulares los parámetros obtenidos no presentan carácter comparativo (Taus).

En la presente investigación se hará uso de la norma ASTM C1585 – 04 “Standart Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hidraulic-Cement Concret”.

2.8.1.- Utilización

El desempeño del hormigón sujeto a muchos ambientes agresivos es una función, a largo plazo, de penetrabilidad de su sistema de poros. En el hormigón no saturado el ritmo de penetración de agua u otros líquidos está fuertemente controlado por la absorción debida al ascenso capilar, este método de ensayo está basado en el desarrollado por Hall, que denominó como “sortividad de agua”.

La absorción de agua de la superficie del hormigón depende de muchos factores, incluyendo los siguientes:

- Las dosificaciones de la mezcla de hormigón.
- La presencia de aditivos químicos y de materiales cementicios suplementarios.
- La composición y características físicas de los componentes cementicios y de los áridos.
- El contenido de aire incorporado.
- El tipo y duración del curado.
- El grado de hidratación o edad.
- La presencia de micro fisuras.

- La presencia de tratamientos superficiales tales como selladores o grasas para desmolde.
- El método de vertido incluyendo la compactación y el acabado superficial.

La absorción de agua está también fuertemente afectada por la condición de humedad del hormigón en el momento del ensayo.

Este método pretende determinar la susceptibilidad de un hormigón no saturado a la penetración del agua. En general, el ritmo de absorción del hormigón en la superficie difiere del ritmo de absorción de agua de una muestra tomada en su interior. La superficie exterior está sujeta a menos que el curado pretendido y está expuesta a las condiciones más potencialmente adversas. Este método de ensayo se utiliza para medir el ritmo de absorción de agua tanto de la superficie como del interior del hormigón a través de un testigo perforado y su corte transversal a las profundidades seleccionadas. De esta forma se puede evaluar la absorción a diferentes distancias de la superficie expuesta, o mediante la elaboración de probetas.

2.8.2.- Sector de ensayo

La norma ASTM C1585 – 04 estipula que el transporte de agua mediante absorción capilar en elementos estructurales se encuentra relacionado con el hormigón superficial o también denominado hormigón de recubrimiento, en el cual las características de succión capilar son totalmente opuestas a la zona interna del hormigón.

De tal forma la norma ASTM C1585 – 04 estipula el uso de discos normalizados de 100 ± 6 mm, con un espesor de 50 ± 3 mm, las probetas se obtienen ya sea de probetas cilíndricas elaboradas de acuerdo con lo indicado en la norma C31/C31M o en la C192/C192M, o a partir de testigos perforados de acuerdo a lo establecido en la norma C42/C42M, de su parte superior a la inferior.

El promedio de los resultados de los ensayos de cómo mínimo 2 probetas, constituirá el resultado del ensayo. Las superficies ensayadas deberán estar a la misma distancia de la superficie original expuesta del hormigón.

El hormigón no es un material homogéneo. Además, una superficie exterior de la probeta de hormigón nunca tiene la misma porosidad que el interior del hormigón. Por lo

tanto, las réplicas de las mediciones serán hechas sobre probetas tomadas de la misma profundidad para reducir la dispersión de los datos.

Para efectos de esta investigación, se ha empleado probetas de 10 centímetros de diámetro por 20 centímetros de altura, dividiendo la misma en 4 partes, de los cuales se desechará la parte superior e inferior, tomando en cuenta que la parte media tiene mayor capacidad de absorción.

2.8.3.- Aparatos

Recipiente: Un recipiente impermeable al agua de polietileno u otro material resistente a la corrosión lo suficientemente grande para acomodar las probetas de ensayo con las superficies a ser ensayadas, expuestas al agua.

Dispositivo de soporte: barras, pines u otros aditamentos, fabricados de material resistentes a la corrosión en agua o en soluciones alcalinas, que permitan el libre acceso del agua a la superficie expuesta de la probeta durante el ensayo. Alternativamente las probetas se pueden soportar en varias capas de papel secante o papel de filtro con un espesor total mínimo de 1 mm.

Bascula de plato superior: Que cumpla con la especificación C1005 y con capacidad suficiente para pesar las probetas de ensayo, con una exactitud como mínimo de $\pm 0,01$ g.

Cronometro: Reloj con parada u otro dispositivo que permita medir el tiempo adecuado con exactitud de ± 1 s.

Cámara medioambiental: Una cámara con circulación de aire capaz de mantener una temperatura ambiente de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $80 \pm 3\%$. Alternativamente se puede emplear una estufa que garantice una temperatura de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y un desecador lo suficiente grande para contener las probetas a ensayar. La humedad relativa es controlada en el desecador a $80 \pm 0,5\%$ mediante una solución saturada de bromuro de potasio. La solubilidad del bromuro de potasio es 80,2 g/100g de agua a 50°C , la solución será mantenida en el punto de saturación todo el tiempo del ensayo. La presencia visible de cristales en la solución aporta una evidencia aceptable de la saturación.

Calibrador o pie de rey: Para medir las dimensiones de la probeta hasta el 0,1 mm más cercano.

2.8.4.- Reactivos y materiales

Bromuro de potasio: Grado reactivo, que se requiere si se emplea una estufa y un sistema de desecadores.

Material de sellado: Bandas de láminas adhesivas de baja permeabilidad, pintura epoxi, cinta tape de electricidad, cinta tape para conductos o cinta tape de aluminio. El material utilizado no requerirá un tiempo de curado mayor de 10 minutos.

Bolsa o lamina plástica: Cualquier tipo de bolsa o lámina plástica que se pueda atar a la probeta para controlar la evaporación de su superficie no expuesta al agua. Se requiere de una liga o resorte plástico para mantener la bolsa o lamina en su lugar durante las mediciones.

2.8.5.- Condiciones de la muestra

Se deberá colocar las probetas de ensayo en la cámara medioambiental a temperatura de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $80 \pm 3\%$ durante 3 días. Alternativamente, colocar las probetas de ensayo en un desecador dentro de una estufa a temperatura de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 3 días. Si se emplea el desecador tendrá que controlarse la humedad relativa en el desecador con una solución saturada de bromuro de potasio, pero sin permitir que las probetas de ensayo contacten la solución.

Después de los 3 días, se colocará la probeta dentro de una bolsa sellable, empleando una bolsa separada para cada probeta, se tomarán precauciones para permitir el libre flujo de aire alrededor de cada probeta con vistas a asegurar un contacto mínimo de la probeta con las paredes de la bolsa.

Se almacenará las bolsas selladas a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ como mínimo durante 15 días antes de comenzar con el procedimiento de absorción.

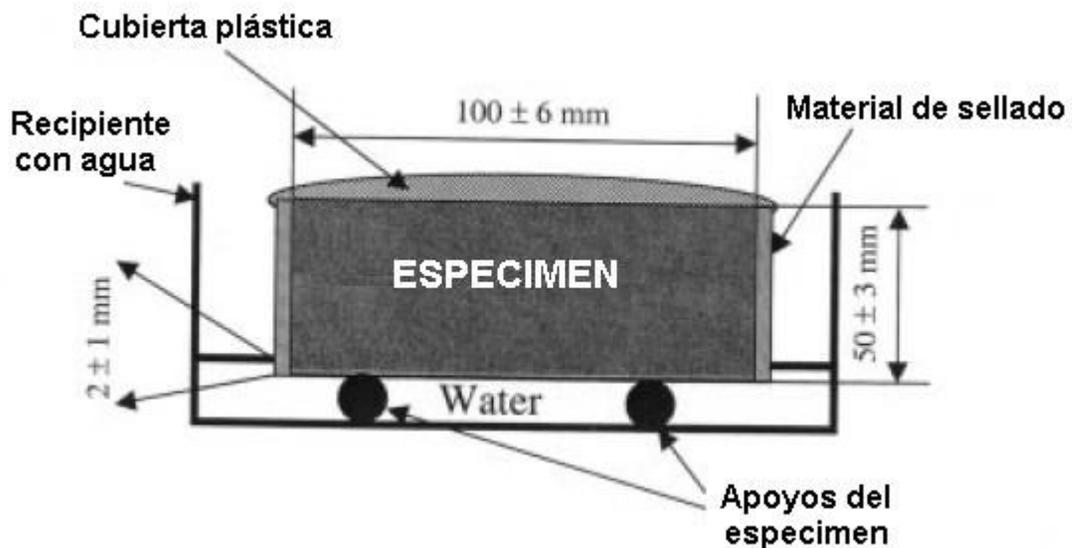
El almacenaje en una bolsa sellada por un mínimo de 15 días da como resultado el equilibrio en la distribución de humedad dentro de las probetas de ensayo y se ha encontrado que garantiza una humedad relativa interna de 50 a 70°C.

2.8.6.- Procedimiento

Se extrae la probeta del recipiente de almacenaje y registra la masa de la probeta acondicionada al 0,01 g más cercano, antes de sellar sus superficies laterales.

La superficie lateral de cada probeta es sellada con un material apropiado, sellando el extremo de la probeta que no quedará expuesta al agua utilizando una liga o banda elástica u otro sistema equivalente.

Figura 2.5: Esquema del procedimiento de sortividad.



Una vez determinada la masa de la probeta sellada al 0,01 g más cercano, es registrada como la masa inicial para los cálculos de la absorción de agua.

Se coloca el dispositivo de soporte de la probeta en el fondo del recipiente y es llenado con agua de manera que el nivel de agua este de 1 a 3 mm por encima de la parte superior del dispositivo de soporte durante todo el ensayo.

Se registra la masa de la probeta a intervalos después del primer contacto con el agua, el primer punto debería ser a 60 ± 2 segundos y el segundo punto a $5 \text{ min} \pm 10$

segundos. Las medidas subsecuentes estarán dentro de ± 2 min de 10 minutos, 30 minutos y 60 minutos. El tiempo real estará registrado dentro de ± 10 segundos, se deberá continuar las mediciones cada hora ± 5 minutos, hasta las 6 horas iniciales, tomando medidas una vez al día hasta los 3 días, seguido por 3 medidas al menos separadas 24 horas durante los días 4 al 7; se toma una media final que está definida como mínimo 24 horas después de la medida a 7 días. El tiempo real de las mediciones deberá ser registrado dentro de ± 1 min. Esto dará como resultado siete puntos de datos para el tiempo de contacto durante los días 2 al 8.

Para cada determinación de masa, deberá extraerse la probeta del recipiente, parando el dispositivo medidor del tiempo si el tiempo de contacto es menor de 10 minutos y secando cualquier superficie mojada con un paño o toalla de papel húmeda. Después de secar el exceso de agua de la superficie, invirtiendo la probeta de manera que la parte húmeda no entre en contacto con el plato de la balanza (para evitar el tener que secar el plato de la balanza). En un intervalo de 15 segundos de extraer la probeta del recipiente, se mide su masa al 0,01 g más cercano. Inmediatamente se vuelve a colocar la probeta en el dispositivo soporte y contabiliza el tiempo nuevamente.

2.9.- Ensayo de penetración de agua bajo presión

Permite determinar la profundidad de agua en un hormigón endurecido mediante presión, el mismo que permite evaluar la permeabilidad y durabilidad del mismo.

Si bien en el ensayo, se permite diámetros de probetas de 10, 15 y 30 centímetros, siempre y cuando la relación entre altura y diámetro sea igual o mayor a 0,5, para esta investigación se hará uso de probetas de 15 centímetros de diámetro por 30 centímetros de alto.

Las probetas de ensayo serán evaluadas a una edad de 28 días con un curado normal en ambiente de laboratorio, sin embargo, a falta de un día para la realización de las pruebas, las probetas serán colocadas en estufas a 50°C, dejándolas enfriar posteriormente a 20°C tal cual indica la norma.

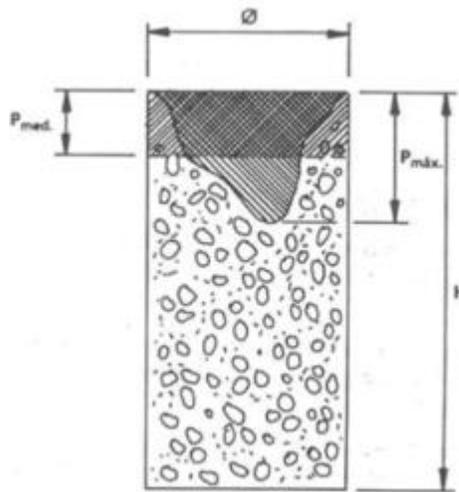
Deberá colocarse la probeta en el aparato de ensayo, fijándola a la misma y procurando que en todo momento el anillo de goma permanezca en la zona interna de la cara en análisis de la probeta donde se aplicará el flujo.

Una vez controlado todos los parámetros de seguridad entre la probeta y el aparato de ensayo, se procede a aplicar una presión de 100 kPa durante las primeras 48 horas, transcurrido ese tiempo, la presión aumentará a 300 kPa durante 24 horas tras lo cual, se incrementará por última vez la presión a 700 kPa por 24 horas. En caso de detectarse fugas de agua, el ensayo deberá pararse.

Finalizado el tiempo de ensayo, las probetas serán retiradas del aparato de ensayo y deberán romperse en 2 mitades perpendiculares a la cara de ensayo, mediante el ensayo de tracción o método brasileño.

Tras la rotura, deberá medirse la profundidad media y profundidad máxima reflejada en el frente de ensayo de las probetas, como se indica en la figura 2.6.

Figura 2.6: Medición de profundidades de agua bajo presión.

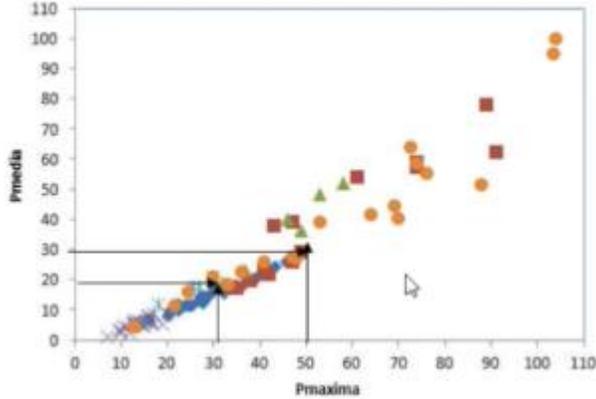


Fuente: Extraído de PLAN EILA 2017 – Instituto Torroja

Al momento de evaluar los datos, tendrá que tomarse en cuenta, que la profundidad media no podrá superar los 30 mm y la profundidad máxima los 50 mm, en dicho caso, el hormigón no podría catalogarse como durable, sin embargo, en las variables de análisis podrían surgir diferentes problemas, como poros de mayor tamaño en alguna zona

específica, lo que falsearía totalmente el ensayo. Una referencia puede ser observada en la figura 2.7.

Figura 2.7: Dispersión de datos en valores superiores a 50 mm en profundidades de agua.



Fuente: Extraído de PLAN EILA 2017 – Instituto Torroja

Capítulo III

MARCO PRACTICO

3.1.- Introducción

El estudio es presentado como una investigación de carácter experimental, contemplando dos variables para el análisis, siendo la primera la relación agua/cemento, empleando tres valores (0,45; 0,52 y 0,60) y la cantidad de residuo de fabricación de cemento a emplear, considerándose los valores de 5, 10 y 15%.

Al centrarse en el ámbito de la durabilidad del hormigón, los conceptos a emplear y correlacionar, estarán ligados con la definición de que el agua es el principal agente de deterioro, por lo tanto, se analizaron dos métodos relacionados como ser: velocidad de absorción o sortividad y la penetración de agua bajo presión y como un factor mecánico se realizó el ensayo de resistencia a la compresión.

3.2.- Identificación de variables

Variables independientes. - Definidas como la causa por la que se supone que es la responsable original de los cambios en un fenómeno o situación.

Para el presente estudio, las variables independientes son las siguientes:

- Relación agua/cemento, empleando valores de 0,45, 0,52 y 0,60.
- Porcentaje de reemplazo de residuos de fabricación de cemento El Puente, sustituyendo al cemento en cantidades del 5, 10 y 15%.

Variables dependientes. - Son aquellas que el investigador estudia, las cuales varían según los cambios que se produzcan en las variables dependientes.

En esta investigación se tomará en cuenta tres variables dependientes, siendo estas:

- Resistencia a la compresión.
- Velocidad de absorción.
- Penetración de agua bajo presión.

3.2.1.- Glosario

Muestras para resistencia a la compresión:

- PT1-01, PT1-02, PT1-03, PT1-04, PT1-05: Muestras patrón para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.45
- R5.1-1, R5.1-2, R5.1-3, R5.1-4, R5.1-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 5%
- R10.1-1, R10.1-2, R10.1-3, R10.1-4, R10.1-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 10%
- R15.1-1, R15.1-2, R15.1-3, R15.1-4, R15.1-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 15%
- PT2-01, PT2-02, PT2-03, PT2-04, PT2-05: Muestras patrón para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.52
- R5.2-1, R5.2-2, R5.2-3, R5.2-4, R5.2-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 5%
- R10.2-1, R10.2-2, R10.2-3, R10.2-4, R10.2-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 10%
- R15.2-1, R15.2-2, R15.2-3, R15.2-4, R15.2-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 15%
- ❖ PT3-01, PT3-02, PT3-03, PT3-04, PT3-05: Muestras patrón para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.60
- ❖ R5.3-1, R5.3-2, R5.3-3, R5.3-4, R5.3-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 5%
- ❖ R10.3-1, R10.3-2, R10.3-3, R10.3-4, R10.3-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 10%
- ❖ R15.3-1, R15.3-2, R15.3-3, R15.3-4, R15.3-5: Muestras para ensayo de resistencia a la compresión con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 15%

Muestras para velocidad de absorción:

- P1-1, P1-2, P1-3: Muestras patrón para velocidad de absorción con relación A/C de 0.45
- V5.1-1, V5.1-2, V5.1-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 5%
- V10.1-1, V10.1-2, V10.1-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 10%
- V15.1-1, V15.1-2, V15.1-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 15%
- P2-1, P2-2, P2-3: Muestras patrón para velocidad de absorción con relación A/C de 0.52
- V5.2-1, V5.2-2, V5.2-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 5%
- V10.2-1, V10.2-2, V10.2-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 10%
- V15.2-1, V15.2-2, V15.2-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 15%
- ❖ P3-1, P3-2, P3-3: Muestras patrón para velocidad de absorción con relación A/C de 0.60
- ❖ V5.3-1, V5.3-2, V5.3-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 5%
- ❖ V10.3-1, V10.3-2, V10.3-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 5%
- ❖ V15.3-1, V15.3-2, V15.3-3: Muestras para velocidad de absorción con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 5%

Muestras para penetración de agua bajo presión:

- A1-1, A1-2, A1-3: Muestras patrón para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.45
- B1-1, B1-2, B1-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 5%
- C1-1, C1-2, C1-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 10%
- D1-1, D1-2, D1-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.45 y reemplazo parcial de 15%
- A2-1, A2-2, A2-3: Muestras patrón para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.52
- B2-1, B2-2, B2-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 5%
- C2-1, C2-2, C2-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 10%
- D2-1, D2-2, D2-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.52 y reemplazo parcial de 15%
- ❖ A3-1, A3-2, A3-3: Muestras patrón para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.60
- ❖ B3-1, B3-2, B3-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 5%
- ❖ C3-1, C3-2, C3-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 10%
- ❖ C3-1, C3-2, C3-3: Muestras para ensayo de penetración de agua bajo presión con relación A/C de 0.60 y reemplazo parcial de 15%

3.3.- Diseño de probetas

Para el desarrollo de la investigación, se hizo uso de dos tipos de probetas, con el fin de adaptarse a los valores que recomienda la norma ASTM, la primera corresponde a las medidas de 15 centímetros de diámetro por 30 centímetros de altura, empleada para ensayos de resistencia a la compresión y penetración de agua bajo presión, como también probetas de 10 centímetros de diámetro por 20 centímetros de altura, las cuales fueron utilizadas en el ensayo de velocidad de absorción o sortividad.

El uso de probetas en los tres ensayos mencionados, permitieron recolectar información que al ser evaluada y analizada mediante los límites y recomendaciones que brinda las normas ASTM, dio lugar a una evaluación sobre las características presentadas en el hormigón con adición de residuos de fabricación de cemento, contemplando de esta forma si la incorporación es capaz de mantener las características de durabilidad en el hormigón.

Para un análisis comparativo de las situaciones de reemplazo parcial de cemento por residuos de fabricación de cemento El Puente, se consideró un mínimo de 5% y un máximo de 15%, tomando en cuenta que valores elevados de adición en el hormigón se consideran negativos en el ámbito de resistencia y durabilidad.

Para hacer uso de los residuos de fabricación, se tomó en cuenta que la finura de los mismos debía ser igual o menor a la del cemento, en el caso de esta investigación la finura empleada es de un valor aproximadamente menor a la del cemento.

3.3.1.- Materiales empleados

En la elaboración del hormigón, se hizo uso de cemento “El Puente” IP-30 en conjunto con agregado obtenido de bancos de Santa Ana, de tal forma se limita la investigación a materiales obtenidos en alrededores de la ciudad de Tarija.

Agregado fino:

El agregado fino a utilizar, proveniente de bancos de Santa Ana, presenta un color gris, en primera instancia considerada medianamente graduada, de tipo gruesa.

Presenta las siguientes características físicas:

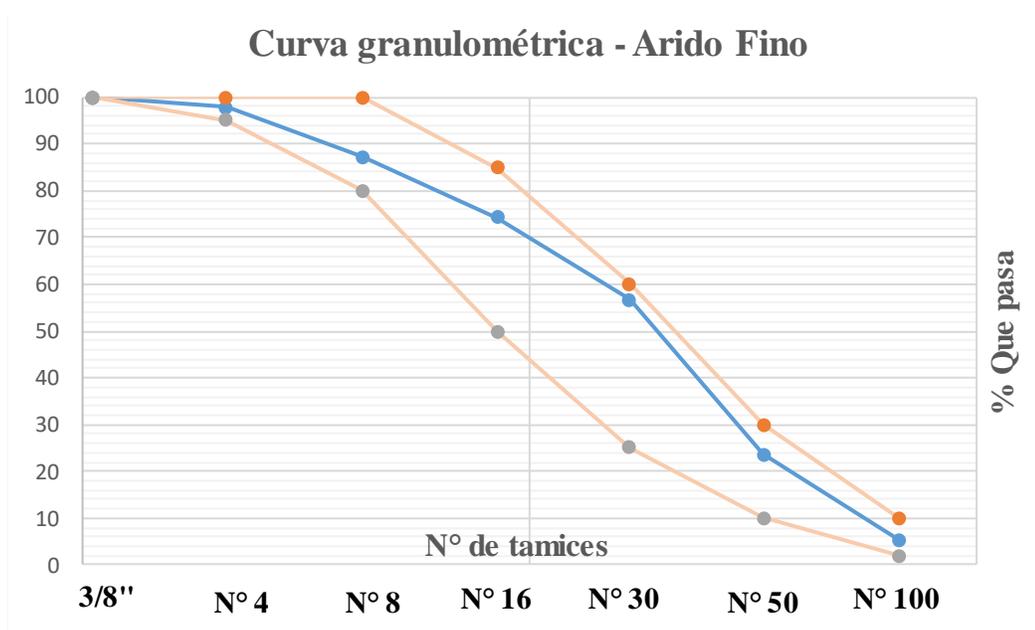
Tabla 3.1: Características físicas del agregado fino

Densidad seca	2380,95	Kg/m ³
% de absorción	1,93	%
% de humedad	4,97	%
Porcentaje de terrones y partículas desmenuzables	0,8	%
Porcentaje de material fino < 75 µm	3,67	%
Módulo de finura	2,55	adm

Los valores obtenidos mediante tamizado, se encuentran en el anexo N° 1.

La curva granulométrica obtenida mediante el tamizado es la siguiente:

Figura 3.1: Curva granulométrica del agregado fino.



Como se puede observar, mediante la línea azul que representa la curva granulométrica obtenida mediante tamizado correspondiente entre el tamiz de 3/8" (9,5 mm) y el tamiz N° 100 (0,15 mm), se encuentra comprendida entre los límites aceptados por la norma ASTM representados mediante las tonalidades claras.

Agregado grueso:

El agregado grueso a utilizar, proveniente de bancos de Santa Ana, presenta un color grisáceo, siendo piedra triturada con tamaño máximo de 19 milímetros.

Se ha considerado emplear material triturado en la matriz de hormigón, con la finalidad de tener mejor sinergia entre los materiales empleados, buscando aminorar la cantidad de vacíos, lo cual, de acuerdo con la teoría utilizada, brindaría menos posibilidades de que el agua funcione como un agente de deterioro al encontrarse ante una porosidad elevada.

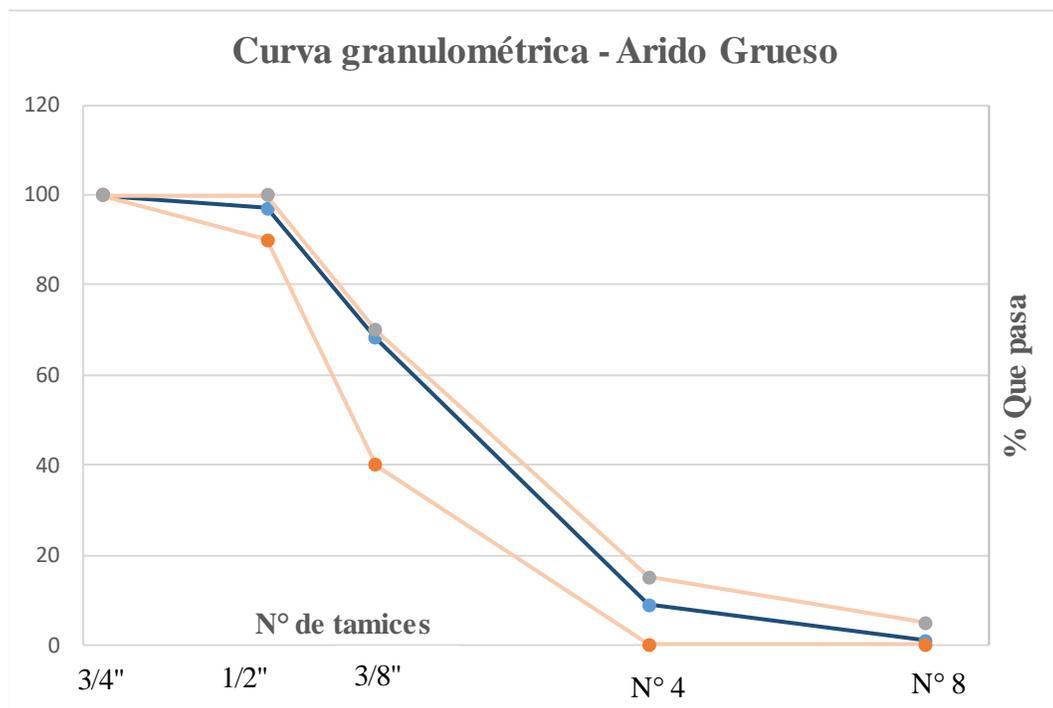
Presenta las siguientes características físicas:

Tabla 3.2: Propiedades físicas del agregado grueso.

Densidad seca	2650	Kg/m ³
% de absorción	0.93	%
% de humedad	2.3	%
Porcentaje de material fino < 75 µm (Carbón o lignitos)	0,56	%
Porcentaje de material fino < 75 µm	0.56	%
Porcentaje de pérdida de abrasión de los ángeles	3.84	%

La curva granulométrica obtenida mediante el tamizado correspondiente es la siguiente:

Figura 3.2: Curva granulométrica del agregado grueso.



Como se puede observar, mediante la línea azul que representa la curva granulométrica obtenida mediante tamizado correspondiente entre el tamiz de 3/4" (19 mm) y el tamiz N° 8 (2,36 mm), se encuentra comprendida entre los límites aceptados por la norma ASTM representados mediante las tonalidades claras.

3.3.2.- Dosificación

La dosificación empleada, corresponde a la utilizada por la ACI (American Concrete Institute), la misma fue aplicada en las probetas de ensayo, correspondiendo a las tres relaciones agua/cemento empleadas de 0,45; 0,52 y 0,60.

El efecto de utilizar diferentes relaciones agua/cemento es conocer la variación que existe en las características a ser estudiadas y el cómo esta variable es determinante en el rubro de la durabilidad, bajo el concepto de que a menor relación agua/cemento existirá menor permeabilidad y por lo tanto mayor durabilidad.

La resistencia y la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada, están mutuamente relacionadas a través de la porosidad capilar que es controlada por la relación agua/cemento y por el grado de hidratación.

Generalmente, con la excepción de la resistencia al congelamiento-descongelamiento, puesto que la durabilidad del concreto está controlada principalmente por su permeabilidad, no es difícil entender por qué hay una relación directa entre la resistencia y la durabilidad.

Consecuentemente, en operaciones rutinarias de diseño de la mezcla, solamente se hace hincapié en la trabajabilidad y la resistencia; la consideración de la durabilidad se ignora, a menos que lo requiera una exposición a ambientes especiales.

Dosificación con relación agua/cemento de 0,45:

La primera dosificación en estudio y de la cual se espera, tenga mayor resistencia a la compresión en 28 días, los valores obtenidos mediante el cálculo respectivo son:

Tabla 3.3: Material utilizado para relación agua/cemento de 0,45

Relación Agua/Cemento = 0,45		
Material	Peso seco	Peso húmedo
	Kg/m ³	Kg/m ³
Cemento	422,22	422,22
Agua	190,00	155,44
Agregado fino	664,53	697,56
Agregado grueso	1051,75	1075,94

Tabla 3.4: Peso de residuo de cemento para reemplazo en relación agua/cemento de 0,45.

Peso de residuo para reemplazo de cemento		
5%	21,1	Kg
10%	42,2	Kg
15%	63,3	Kg

La cantidad de residuo de fabricación de cemento ha sido reemplazada en el factor aglomerante (cemento), considerando los valores obtenidos en la tabla 3.4 los necesarios para un metro cúbico de hormigón con relación agua/cemento de 0,45, en proporciones de 5, 10 y 15%.

Dosificación con relación agua/cemento de 0,52:

Los valores obtenidos mediante dosificación para una relación agua/cemento igual a 0,52 responde a los siguientes valores:

Tabla 3.5: Material utilizado para relación agua/cemento de 0,52

Relación Agua/Cemento = 0,52		
Material	Peso seco	Peso húmedo
	Kg/m ³	Kg/m ³
Cemento	365,38	365,38
Agua	190,00	154,13
Agregado fino	707,49	742,65
Agregado grueso	1051,75	1075,94

Tabla 3.6: Peso de residuo de cemento para reemplazo en relación agua/cemento de 0,52.

Peso de residuo para reemplazo de cemento		
5%	18,3	Kg
10%	36,5	Kg
15%	54,8	Kg

La cantidad de residuo de fabricación de cemento ha sido reemplazada en el factor aglomerante (cemento), considerando los valores obtenidos en la tabla 3.6 los necesarios para un metro cúbico de hormigón con relación agua/cemento de 0,52, en proporciones de 5, 10 y 15%.

Dosificación con relación agua/cemento de 0,60:

Los valores obtenidos mediante dosificación para una relación agua/cemento igual a 0,52 responde a los siguientes valores:

Tabla 3.7: Material utilizado para relación agua/cemento de 0,60

Relación Agua/Cemento = 0,60		
Material	Peso seco	Peso húmedo
	Kg/m ³	Kg/m ³
Cemento	316,67	316,67
Agua	190,00	153,01
Agregado fino	744,32	781,31
Agregado grueso	1051,75	1075,94

Tabla 3.8: Peso de residuo de cemento para reemplazo en relación agua/cemento de 0,60.

Peso de residuo para reemplazo de cemento		
5%	15,8	Kg
10%	31,7	Kg
15%	47,5	Kg

La cantidad de residuo de fabricación de cemento ha sido reemplazada en el factor aglomerante (cemento), considerando los valores obtenidos en la tabla 3.8 los necesarios para un metro cúbico de hormigón con relación agua/cemento de 0,60, en proporciones de 5, 10 y 15%.

3.4.- Elaboración de probetas

Para la elaboración de muestras y de acuerdo al plan experimental, se plantearon diferentes mezclas produciendo modificaciones en la relación agua/cemento y en el porcentaje de reemplazo de residuos de fabricación del cemento por cemento. Ello con el fin de evaluar los efectos de diferentes factores tecnológicos frente al transporte de agua por capilaridad.

Se ha considerado 3 relaciones agua/cemento durante el estudio, las mismas responden a 0,45; 0,52 y 0,60. El criterio de análisis se basa en que una relación agua/cemento baja genera menor cantidad de poros, por ende, menor permeabilidad y mayor durabilidad.

Han sido elaboradas dos tamaños de probetas con base en las recomendaciones de las normas ASTM, tanto para los ensayos de resistencia como de velocidad de absorción. El curado empleado fue de tipo estacionado en ambiente de laboratorio con temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa del 50%.

Las probetas han sido elaboradas y ensayadas en instalaciones de laboratorios de cemento “El Puente”.

3.5.- Evaluación del hormigón endurecido

El análisis del hormigón endurecido corresponde en esta investigación a las características encontradas a los 28 días de elaboración, producto de haber realizado ensayos de resistencia a la compresión, velocidad de absorción y penetración de agua bajo presión.

3.5.1.- Resistencia a la compresión

A los 28 días se realizó la rotura de probetas para las diferentes combinaciones de relación agua/cemento y reemplazo de residuo de fabricación de cemento. Considerando un total de 60 muestras, entre las cuales se encuentran 20 probetas elaboradas para cada relación agua/cemento de 0,45, 0,52 y 0,60.

Relación agua/cemento de 0,45:

Las probetas elaboradas con una relación a/c de 0,45 presentaron las siguientes resistencias al efectuar la rotura a los 28 días:

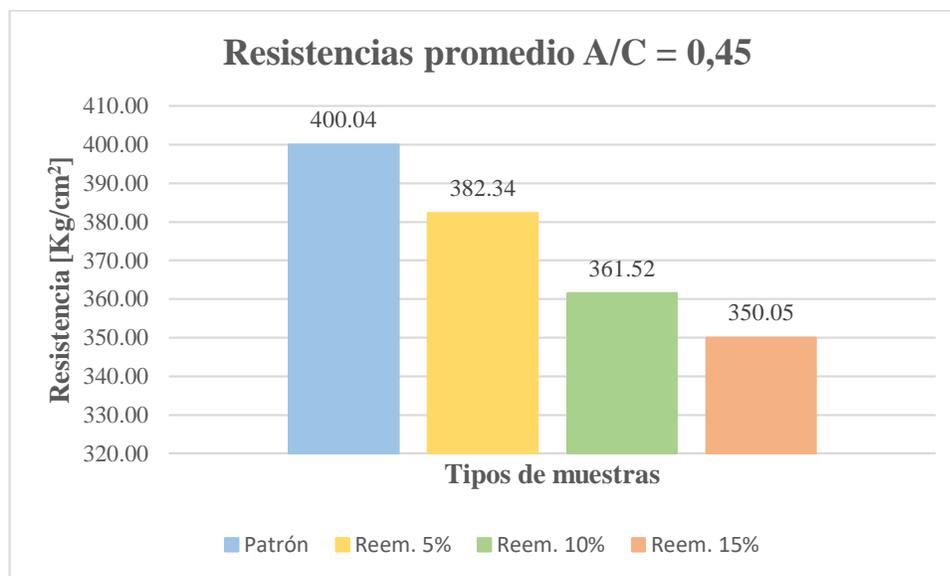
Tabla 3.9: Resistencias con relación agua/cemento de 0,45.

Resistencias con dosificación A/C = 0,45							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
413,05	Kg/cm ²	384,43	Kg/cm ²	370,50	Kg/cm ²	351,99	Kg/cm ²
397,56	Kg/cm ²	384,62	Kg/cm ²	358,69	Kg/cm ²	354,56	Kg/cm ²
391,36	Kg/cm ²	392,89	Kg/cm ²	363,56	Kg/cm ²	346,45	Kg/cm ²
400,04	Kg/cm ²	373,40	Kg/cm ²	358,54	Kg/cm ²	349,92	Kg/cm ²
398,20	Kg/cm ²	376,37	Kg/cm ²	356,31	Kg/cm ²	347,36	Kg/cm ²
400,04	Kg/cm ²	382,34	Kg/cm ²	361,52	Kg/cm ²	350,05	Kg/cm ²

Como se puede notar, los valores obtenidos en laboratorio, en el caso de la muestra patrón sobrepasan el estimado de 370 Kg/cm² que había concebido al inicio del ensayo, sin embargo, al comparar los resultados obtenidos de las probetas que contenían reemplazos de residuo de fabricación de cemento, se determinó que existe una disminución del 4,42% al efectuarse un reemplazo del 5%, un 9,63% cuando se hubo incorporado un 10% de reemplazo y finalmente un 12,5% ante un porcentaje de reemplazo del 15% de residuos de fabricación del cemento.

A nivel gráfico, los valores responden de la siguiente forma:

Figura 3.3: Resistencias promedio para relación agua/cemento de 0,45.



Relación agua/cemento de 0,52:

Las probetas elaboradas con una relación a/c de 0,52 presentaron las siguientes resistencias al efectuar la rotura a los 28 días:

Tabla 3.10: Resistencias con relación agua/cemento de 0,52.

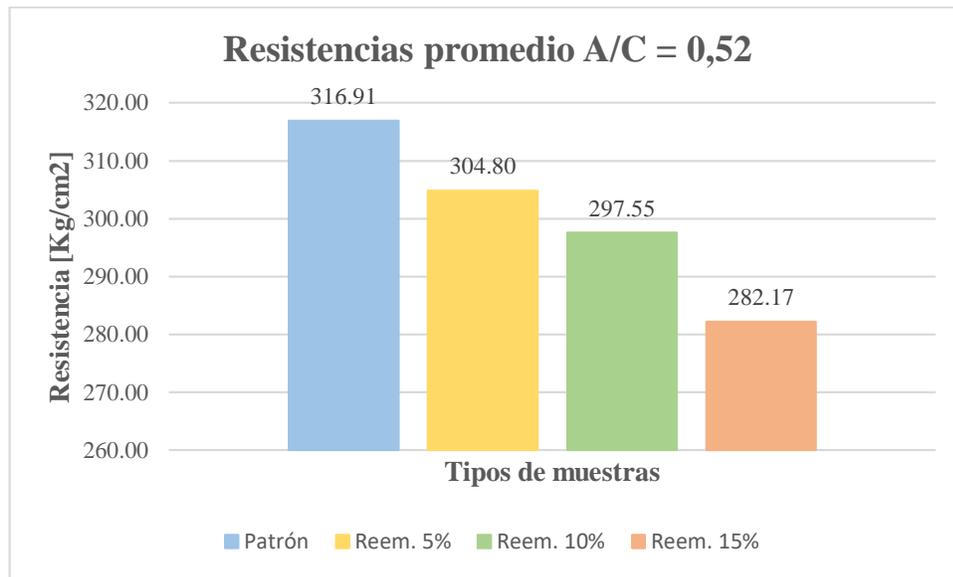
Resistencias con dosificación A/C = 0,52							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
347,02	Kg/cm ²	325,34	Kg/cm ²	314,42	Kg/cm ²	297,58	Kg/cm ²
343,16	Kg/cm ²	324,09	Kg/cm ²	308,46	Kg/cm ²	290,67	Kg/cm ²
350,58	Kg/cm ²	313,49	Kg/cm ²	301,53	Kg/cm ²	298,25	Kg/cm ²
353,34	Kg/cm ²	322,05	Kg/cm ²	306,60	Kg/cm ²	289,53	Kg/cm ²
355,70	Kg/cm ²	312,63	Kg/cm ²	305,92	Kg/cm ²	294,52	Kg/cm ²
349,96	Kg/cm ²	319,52	Kg/cm ²	307,39	Kg/cm ²	294,11	Kg/cm ²

En el caso de las probetas de resistencia con una relación agua/cemento de 0,52, había sido esperado un comportamiento en el cual las probetas al momento de la rotura, superen una resistencia de 315 Kg/cm², se determinó que el promedio de las probetas patrón y las que contenían un reemplazo del 5% han superado la resistencia esperada. A

nivel comparativo, las muestras que contienen reemplazo de residuo de fabricación de cemento presentaron reducciones del 8,7% en el caso de muestras con un reemplazo del 5%, una reducción del 12,2% al emplear un 10% de reemplazo y finalmente un 16% en el caso del 15% de reemplazo.

La grafica que representa el comportamiento de resistencias es la siguiente:

Figura 3.4: Resistencias promedio para relación agua/cemento de 0,52.



Relación agua/cemento de 0,60:

Las probetas elaboradas con una relación a/c de 0,60 presentaron las siguientes resistencias al efectuar la rotura a los 28 días:

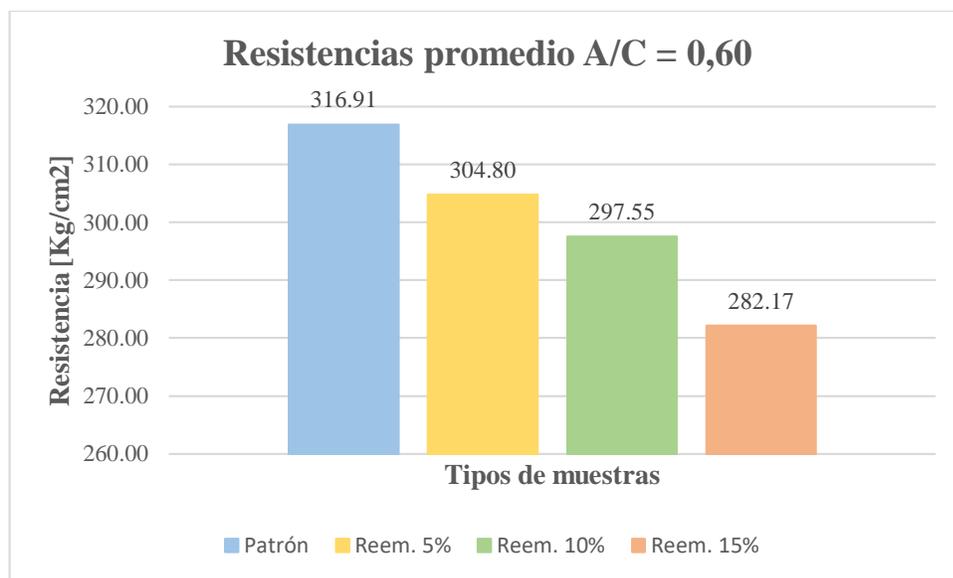
Tabla 3.11: Resistencias con relación agua/cemento de 0,60.

Resistencias con dosificación A/C = 0,60							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
317,42	Kg/cm ²	307,77	Kg/cm ²	300,92	Kg/cm ²	285,42	Kg/cm ²
319,75	Kg/cm ²	305,60	Kg/cm ²	294,60	Kg/cm ²	289,08	Kg/cm ²
320,59	Kg/cm ²	303,27	Kg/cm ²	299,59	Kg/cm ²	283,11	Kg/cm ²
312,34	Kg/cm ²	306,44	Kg/cm ²	297,56	Kg/cm ²	278,67	Kg/cm ²
314,47	Kg/cm ²	300,92	Kg/cm ²	295,07	Kg/cm ²	274,57	Kg/cm ²
316,91	Kg/cm ²	304,80	Kg/cm ²	297,55	Kg/cm ²	282,17	Kg/cm ²

La tabla 3.11 muestra los valores obtenidos en laboratorio, en el caso de la muestra patrón sobrepasan el estimado de 260 Kg/cm² que había concebido al inicio del ensayo, sin embargo, al comparar los resultados obtenidos de las probetas que contenían reemplazos de residuo de fabricación de cemento, se determinó que existe una disminución del 3,82% al efectuarse un reemplazo del 5%, un 6,11% cuando se hubo incorporado un 10% de reemplazo y finalmente un 11% ante un porcentaje de reemplazo del 15% de residuos de fabricación del cemento.

La grafica que representa el comportamiento de resistencias es la siguiente:

Figura 3.5: Resistencias promedio para relación agua/cemento de 0,60.

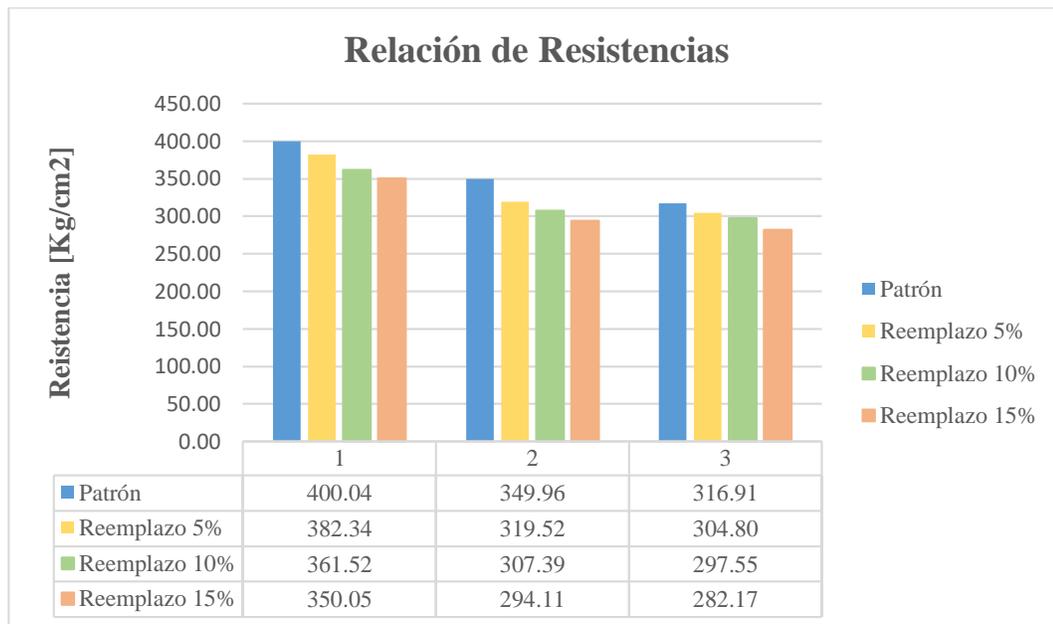


3.5.2.- Análisis comparativo de resistencias

Al iniciar esta investigación, una de las preguntas recurrentes fue los resultados que tendría el hormigón cuando en su matriz de componentes se efectuara un reemplazo parcial de cemento por residuos de fabricación de cemento y tal como su nombre lo indica, al ser residuos o material desechable, fue imposible anticipar los efectos que este pudiera producir en el ámbito de resistencias, dado que, si bien es considerado como un filler, no rescata todas las características que presenta un cemento, por lo cual fue previsto tal como indica una de las hipótesis que la resistencia se vería reducida.

Para una mejor visualización de los resultados obtenidos y reflejados mediante promedios, se presenta la siguiente gráfica, en la cual se considera a la primera tanda de resultados a las muestras con una relación agua/cemento de 0,45, a la segunda columna de resultados los datos obtenidos de probetas con una relación agua/cemento de 0,52 y finalmente la tercera columna de resultados, obtenida de muestras con una relación agua/cemento de 0,60.

Figura 3.6: Relación de resistencias para diferentes relaciones agua/cemento.



Se observa un esquema de resistencias similar, al momento de comparar los diferentes resultados para cada relación agua/cemento. Constando que la reducción de resistencia observada no muestra un patrón disperso o exagerado al momento de reemplazar residuos de fabricación de cemento en la matriz del hormigón en lugar del material aglomerante, en este caso el cemento.

3.5.3.- Velocidad de absorción

En el caso del ensayo de velocidad de absorción o también conocido como sortividad, el cual responde a lo estipulado en la norma ASTM C1585 – 04, se hizo uso de 36 probetas, contemplando 3 probetas para cada combinación entre las relaciones agua/cemento (0,45 – 0,52 – 0,60) y los porcentajes de reemplazo de residuo de fabricación de cemento (Patrón – Reemplazo de 5% - Reemplazo de 10% - Reemplazo de 15%).

Para tal efecto, se emplearon probetas de 10 centímetros de diámetro por 20 centímetros de altura, de las cuales posterior a ser divididas en 4 partes iguales, se hizo uso de las partes centrales.

Al ser un ensayo ligado a la porosidad de la muestra y la interacción que tiene con un líquido con el paso del tiempo, brinda un parámetro importante para evaluar la durabilidad del hormigón, bajo la premisa de que un hormigón con velocidades de absorción elevadas, lo cual contempla valores mayores a $5,2 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$ no podrían considerarse durables.

Muestras con una relación agua/cemento de 0,45

Son el primer lote de análisis y de las cuales se espera el menor grado de sortividad, dado que al tener una relación agua/cemento baja, se considera que es un elemento de baja porosidad y no sería capaz de absorber demasiada agua en el lapso del ensayo.

Los valores de sortividad para las muestras en análisis y el cálculo correspondiente para tales muestras, se encuentra detallado en los anexos 23 al 46.

Muestras patrón

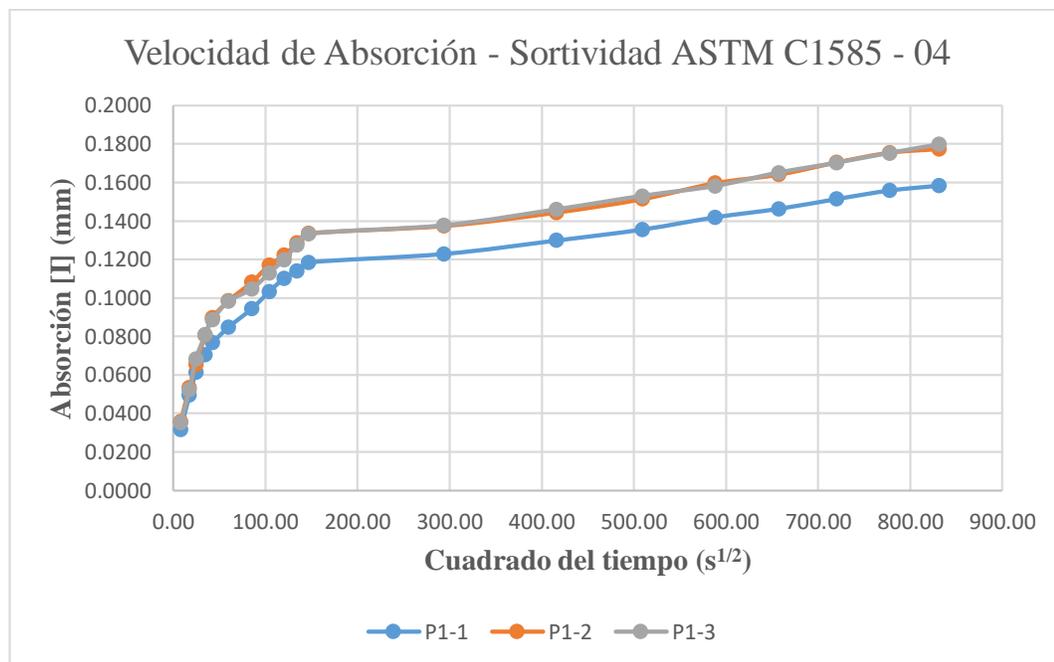
Las primeras tres muestras, corresponden a las probetas patrón, esquematizadas como (P1.1 – P1.2 – P1.3), constituyen el parámetro comparativo respecto a las muestras que contienen reemplazo de residuos de fabricación de cemento. Los parámetros obtenidos de los ensayos realizados son los siguientes:

Tabla 3.12: Parámetros obtenidos en muestras patrón con relación a/c de 0,45.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
P1.1	0,1185	6,23E-04	0,9907	0,1584	5,83E-05	0,9848
P1.2	0,1335	7,04E-04	0,9911	0,1774	6,41E-05	0,975
P1.3	0,1332	7,05E-04	0,9873	0,1797	6,80E-05	0,9814

Los valores obtenidos de sortividad se encuentran en el rango admisible al superar el valor mínimo de $5,2 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$ establecido en la red Durar, a su vez que los valores de correlación se encuentran por encima de 0,98 lo cual da por valido el ensayo, siguiendo las especificaciones dadas por la norma ASTM C1584 – 04, por lo tanto, las muestras patrón nos brindaran un elemento comparativo al momento de verificar las muestras que incorporan residuos de fabricación del cemento. Un esquema comparativo entre las 3 muestras ensayadas se encuentra en la figura 3.7.

Figura 3.7: Gráfica de absorción en muestras patrón con relación a/c de 0,45.



Muestras con reemplazo del 5%

Probetas ensayadas con un reemplazo parcial de cemento del 5% por residuos de fabricación de cemento, determinaron que la absorción inicial correspondiente a las primeras 6 horas de ensayo tuvo un incremento de 10,85%, mientras que la absorción secundaria incrementó en un 8,01% respecto de la muestra patrón con una relación agua/cemento de 0,45, sin embargo, en la tabla 3.13 se observa que los valores de sortividad inicial y secundaria se encuentran por debajo del límite de $5,2 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$.

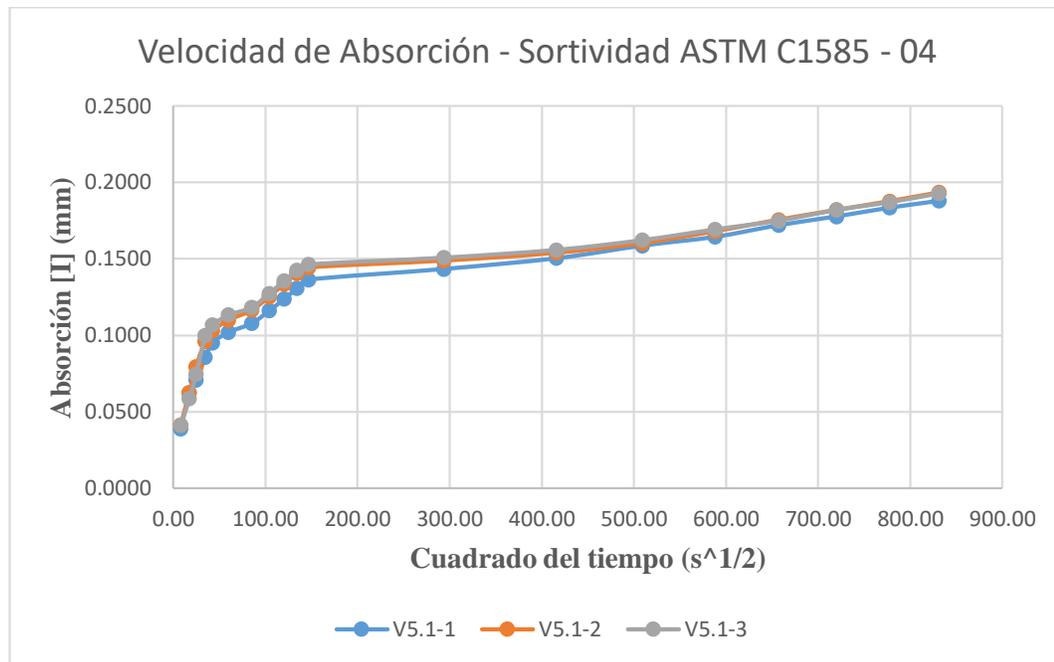
Tabla 3.13: Parámetros obtenidos en muestras con reemplazo del 5% con relación a/c de 0,45.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V5.1.1	0,1363	7,00E-04	0,9882	0,1878	7,53E-05	0,9835
V5.1.2	0,1444	7,40E-04	0,9871	0,1933	7,15E-05	0,9532
V5.1.3	0,1463	7,54E-04	0,9753	0,1927	6,78E-05	0,9582

Si bien los valores de correlación en la etapa secundaria en el caso de 2 probetas se encuentran por debajo de 0,98, las mismas no han llegado al grado de encontrarse bajo el rango de 0,80, lo que ameritaría rehacer el ensayo, por lo tanto, están consideradas dentro de un rango aceptable de error para análisis.

El comportamiento de las probetas a lo largo de los 8 días de ensayo se encuentra reflejado en la figura 3.8.

Figura 3.8: Gráfica de absorción en muestras con reemplazo del 5% con relación a/c de 0,45.



Nota: Las tres muestras presentan un comportamiento bastante similar en cuanto a absorción inicial y secundaria, evitando picos elevados o que estuvieran fuera de rangos esperados.

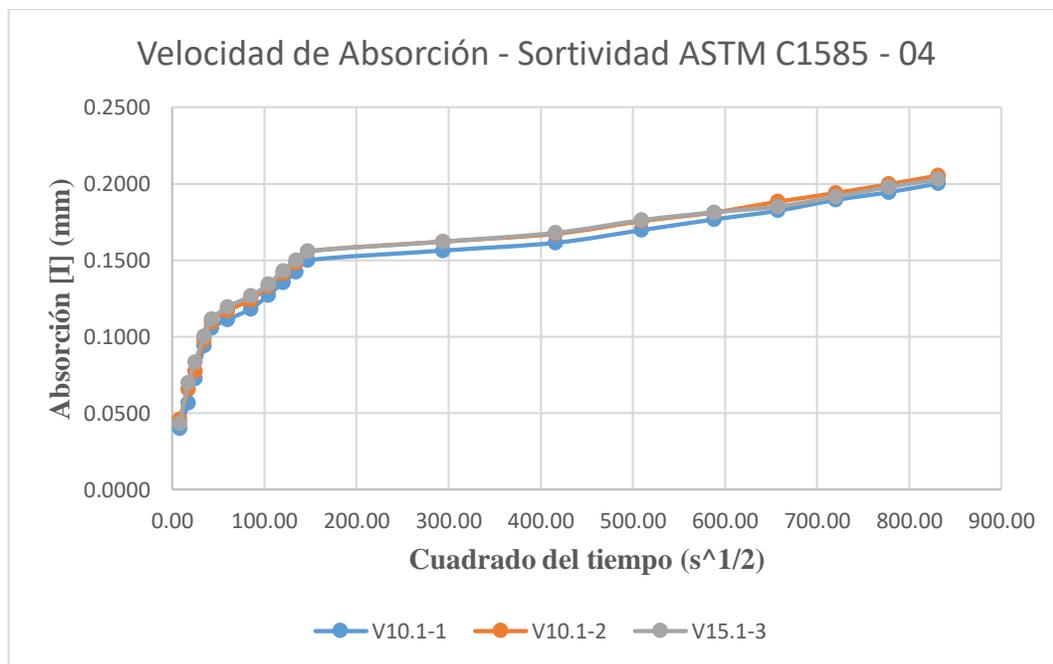
Muestras con reemplazo del 10%

En el caso de las probetas realizadas con un reemplazo parcial de cemento del 10% por residuos de fabricación de cemento, se determinó un incremento del 19,84% en la etapa inicial en absorción y un incremento del 18,03% en la etapa secundaria respecto de las muestras patrón elaboradas con una relación agua/cemento de 0,45, lo que dio lugar a que las muestras de hormigón absorbieran mayor cantidad de agua a lo largo del ensayo, tal como se muestra en la tabla 3.14.

Tabla 3.14: Parámetros obtenidos en muestras con reemplazo del 10% con relación a/c de 0,45.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V10.1.1	0,1499	7,89E-04	0,9785	0,2001	7,33E-05	0,9727
V10.1.2	0,1558	7,90E-04	0,9837	0,2054	7,25E-05	0,9725
V10.1.3	0,1558	8,09E-04	0,9908	0,2029	6,88E-05	0,9778

Figura 3.9: Grafica de absorción en muestras con reemplazo del 10% con relación a/c de 0,45.



La gráfica muestra una tendencia similar en las tres muestras, evitando picos diferenciales y el ajuste prácticamente supera a lo establecido en la norma ASTM C1585 – 04.

Muestras con reemplazo del 15%

Las probetas realizadas con un reemplazo parcial del 15% de fabricación de residuos de cemento, arrojaron los siguientes resultados, determinando un incremento del 22,65% en la etapa inicial en absorción y un incremento del 20,34% en la etapa secundaria respecto a las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,45, tal como se muestra en la tabla 3.15.

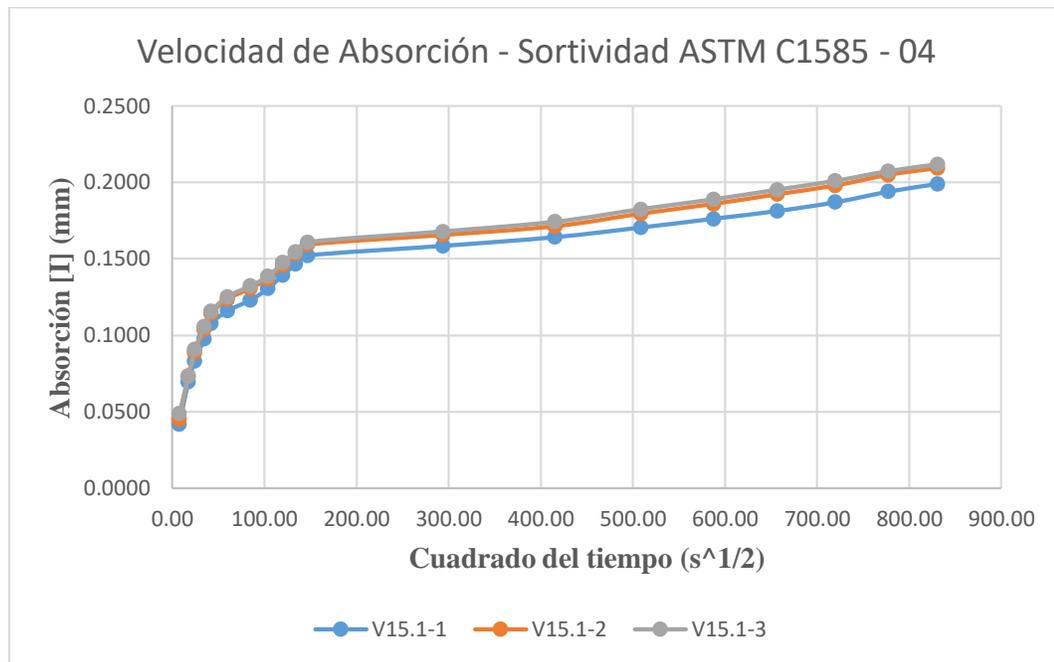
Tabla 3.15: Parámetros obtenidos en muestras con reemplazo del 15% con relación a/c de 0,45.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V15.1.1	0,1522	7,92E-04	0,9916	0,1991	6,86E-05	0,9716
V15.1.2	0,1593	8,21E-04	0,9914	0,2094	7,33E-05	0,9751
V15.1.3	0,1609	8,04E-04	0,9902	0,2118	7,43E-05	0,982

Los resultados arrojados, determinan que la velocidad de absorción inicial y secundaria cumplen con los indicadores de la red Durar, la cual contempla superar una sortividad de $5,2 \times 10^{-2}$ mm/s^{1/2}.

Todos los valores prácticamente han superado un ajuste de 0,98, por lo que se consideran datos consistentes.

Figura 3.10: Gráfica de absorción en muestras con reemplazo del 15% con relación a/c de 0,45.



Muestras con una relación agua/cemento de 0,52

Al igual que las muestras anteriores, el ensayo ha sido realizado en 12 probetas conformadas en las 4 combinaciones de relación a/c y reemplazos de residuos de fabricación de cemento.

Los valores de sortividad para las muestras en análisis y el cálculo correspondiente para tales muestras, se encuentra detallado en los anexos 47 al 70.

Muestras patrón

Las primeras tres muestras, correspondientes a las probetas patrón, esquematizadas como (P2.1 – P2.2 – P2.3), constituyen el parámetro comparativo respecto a las muestras que contienen reemplazo de residuos de fabricación de cemento.

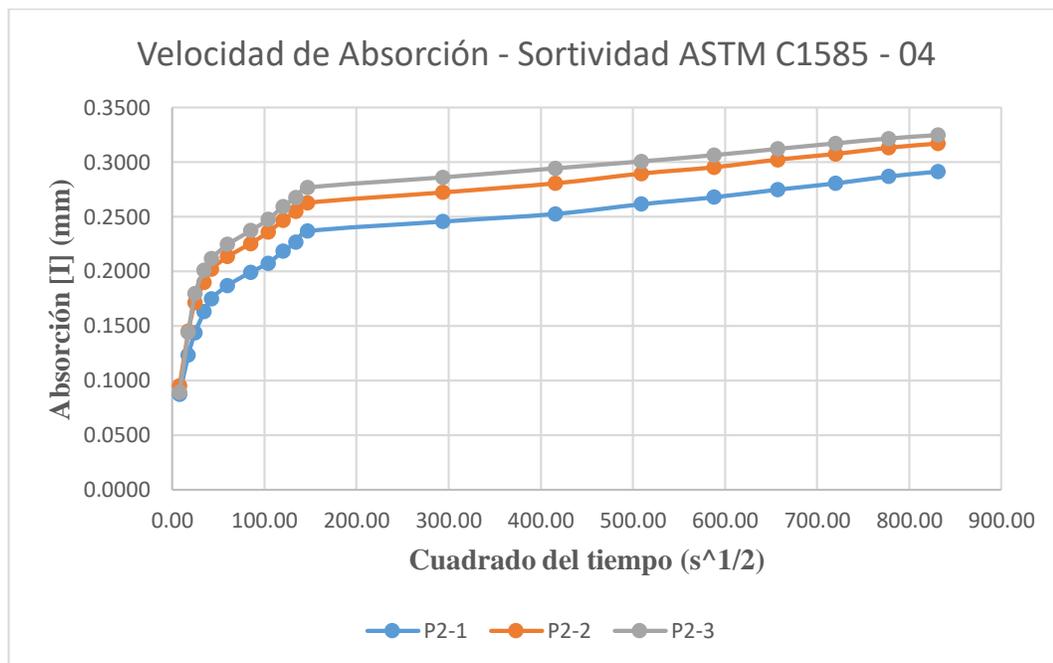
Los parámetros obtenidos de los ensayos realizados son los siguientes:

Tabla 3.16: Parámetros obtenidos en muestras patrón con relación a/c de 0,52.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
P2.1	0,2366	1,07E-03	0,9932	0,2913	7,99E-05	0,989
P2.2	0,2624	1,20E-03	0,9886	0,3167	7,93E-05	0,9958
P2.3	0,2765	1,34E-03	0,9813	0,3246	7,04E-05	0,9883

Los valores obtenidos de sortividad se encuentran en el rango admisible al superar el valor mínimo de $5,2 \times 10^{-2}$ mm/s^{1/2} establecido en la red Durar, a su vez que los valores de correlación se encuentran por encima de 0,98 lo cual da por valido el ensayo, siguiendo las especificaciones dadas por la norma ASTM C1584 – 04, por lo tanto, las muestras patrón nos brindaran un elemento comparativo al momento de verificar las muestras que incorporan residuos de fabricación del cemento. Un esquema comparativo entre las 3 muestras ensayadas se encuentra en la figura 3.11.

Figura 3.11: Gráfica de absorción en muestras patrón con relación a/c de 0,52.



Al evaluar los resultados arrojados en las muestras patrón durante el ensayo de absorción, es notoria una cierta dispersión entre datos, pero aun comprendidos dentro de un rango normal.

Muestras con reemplazo del 5%

Probetas correspondientes a la nomenclatura (V5.2.1 – V5.2.2 – V5.2.3), al emplear un reemplazo parcial de cemento por residuos de fabricación de cemento del 5% para una relación agua/cemento de 0,52, presentan un aumento de valores de absorción de 14,44 y 24,64% en la absorción inicial y secundaria respectivamente ante una comparación con los resultados en las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,52.

Los valores que representan los resultados del ensayo, se ven reflejados en la tabla 3.17, la cual muestra valores de absorción y sortividad, tanto en la etapa inicial comprendida en las primeras 6 horas de análisis como la secundaria, que corresponde a el periodo de 1 día hasta los 8 días donde finaliza el ensayo.

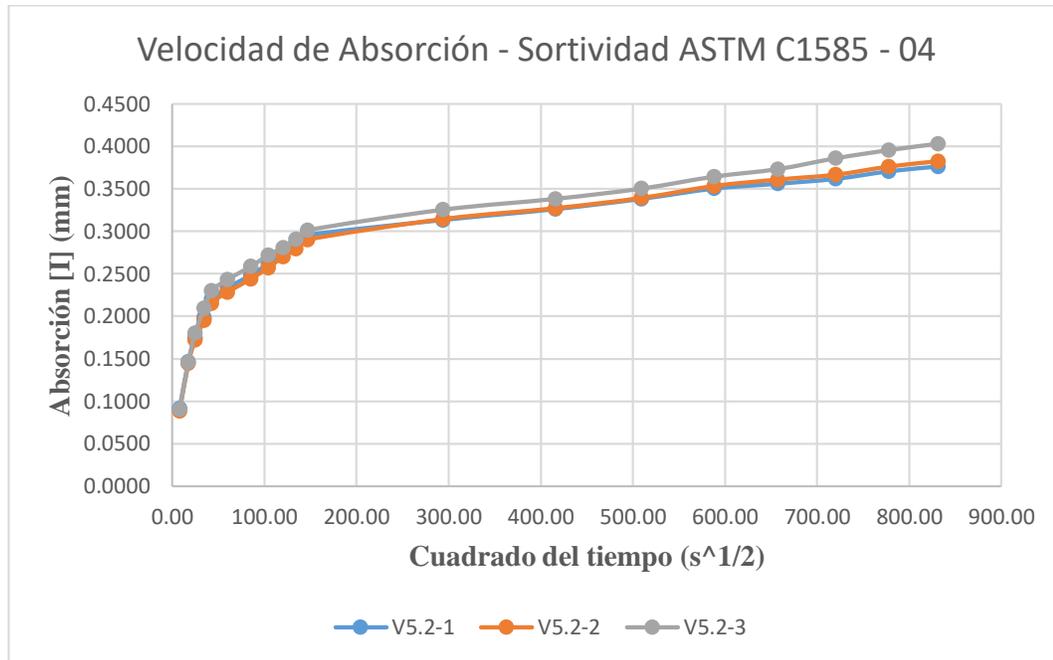
Tabla 3.17: Parámetros obtenidos en muestras con reemplazo del 5% con relación a/c de 0,52.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V5.2.1	0,2957	1,47E-03	0,9933	0,3765	1,18E-04	0,9981
V5.2.2	0,2903	1,45E-03	0,9931	0,3826	1,35E-04	0,9969
V5.2.3	0,3014	1,52E-03	0,988	0,4034	1,49E-04	0,9952

Los resultados obtenidos, determinan que la velocidad de absorción inicial y secundaria cumplen el indicador de ajuste de 0,98 en la norma ASTM C1585 y el de sortividad contemplado en la red Durar que establece que la sortividad inicial y secundaria debe ser mayor a $5,2 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$.

El esquema representativo puede observarse en la figura 3.12:

Figura 3.12: Grafica de absorción en muestras con reemplazo del 5% con relación a/c de 0,52.



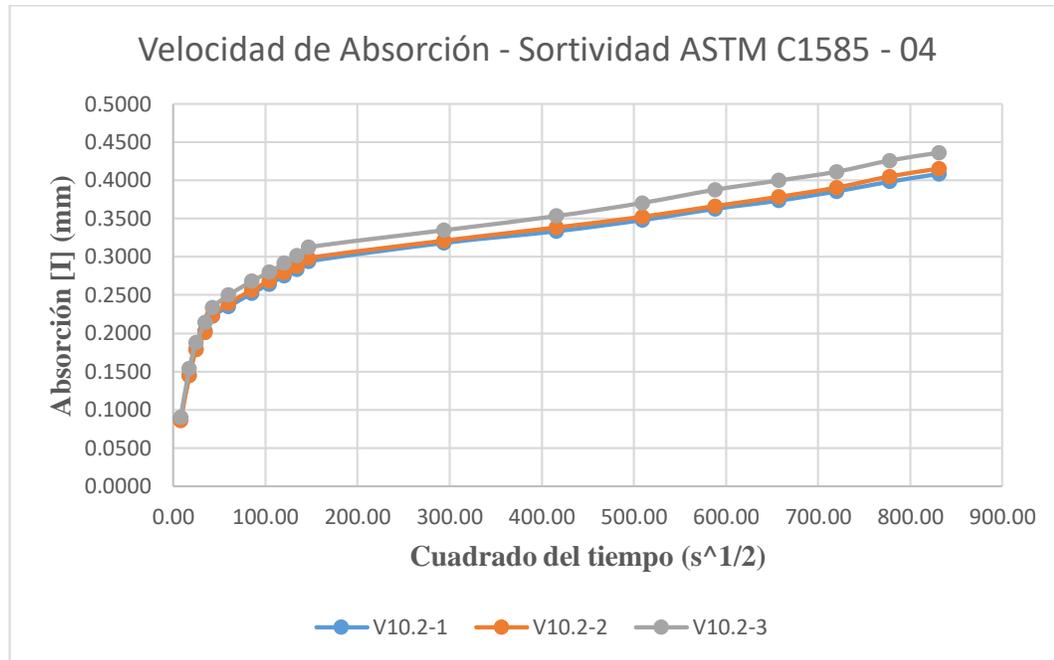
Muestras con reemplazo del 10%

En el caso de las probetas realizadas con un reemplazo parcial de cemento del 10% de fabricación de residuos de cemento, se determinó un incremento del 16,70% en la etapa inicial en absorción y un incremento del 35,09% en la etapa secundaria respecto a las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,52, lo que dio lugar muestras de hormigón absorban mayor cantidad de agua a lo largo del ensayo, tal como se muestra en la tabla 3.18.

Tabla 3.18: Parámetros en muestras con reemplazo del 10% y relación a/c de 0,52.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V10.2.1	0,2942	1,47E-03	0,9905	0,4085	1,67E-04	0,9949
V10.2.2	0,2983	1,53E-03	0,9922	0,4153	1,71E-04	0,993
V10.2.3	0,3126	1,60E-03	0,9914	0,4361	1,80E-04	0,995

Figura 3.13: Gráfica de absorción en muestras con reemplazo del 10% con relación a/c de 0,52.



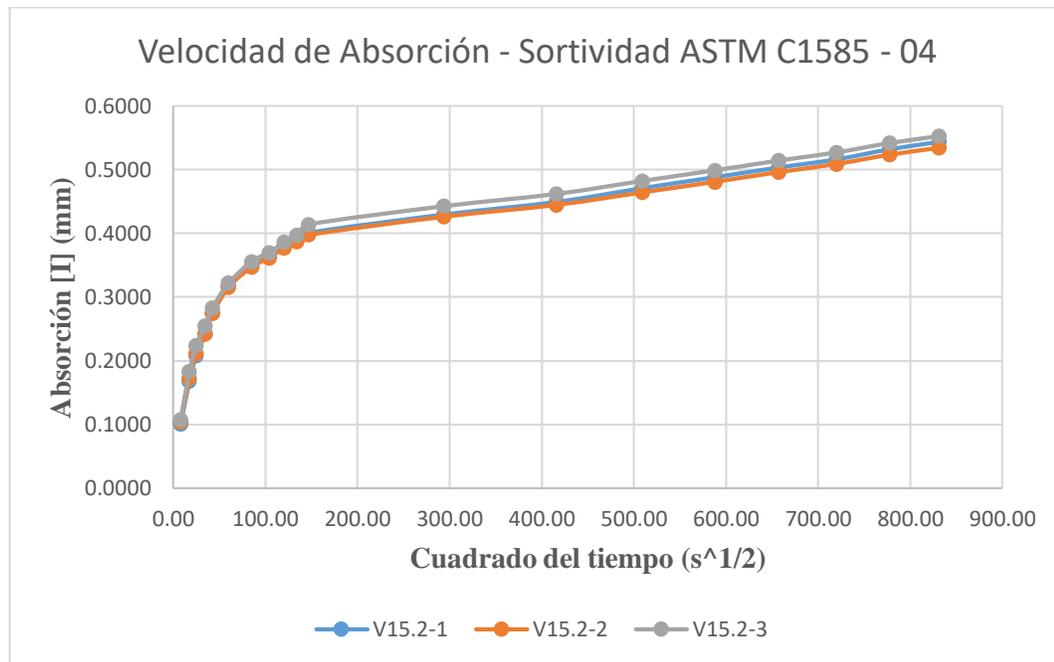
Muestras con reemplazo del 15%

En el caso de las probetas realizadas con un reemplazo parcial de cemento del 15% de fabricación de residuos de cemento, se determinó un incremento del 26,31% en la etapa inicial en absorción y un incremento del 34,75% en la etapa secundaria respecto de las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,52, lo que dio lugar a que las muestras de hormigón absorban mayor cantidad de agua a lo largo del ensayo, tal como se muestra en la tabla 3.19.

Tabla 3.19: Parámetros en muestras con reemplazo del 15% con relación a/c de 0,52.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V15.2.1	0,4011	2,16E-03	0,9962	0,5437	2,08E-04	0,9969
V15.2.2	0,3973	2,11E-03	0,9968	0,5338	1,99E-04	0,9968
V15.2.3	0,4138	2,20E-03	0,9985	0,5523	2,02E-04	0,9973

Figura 3.14: Gráfica de absorción en muestras con reemplazo del 15% con relación a/c de 0,52.



Muestras con una relación agua/cemento de 0,60

Al igual que las muestras anteriores, el ensayo ha sido realizado en 12 probetas conformadas en las 4 combinaciones de relación a/c y reemplazos de residuos de fabricación de cemento.

Los valores de sortividad para las muestras en análisis y el cálculo correspondiente para tales muestras, se encuentra detallado en los anexos 71 al 94.

Muestras patrón

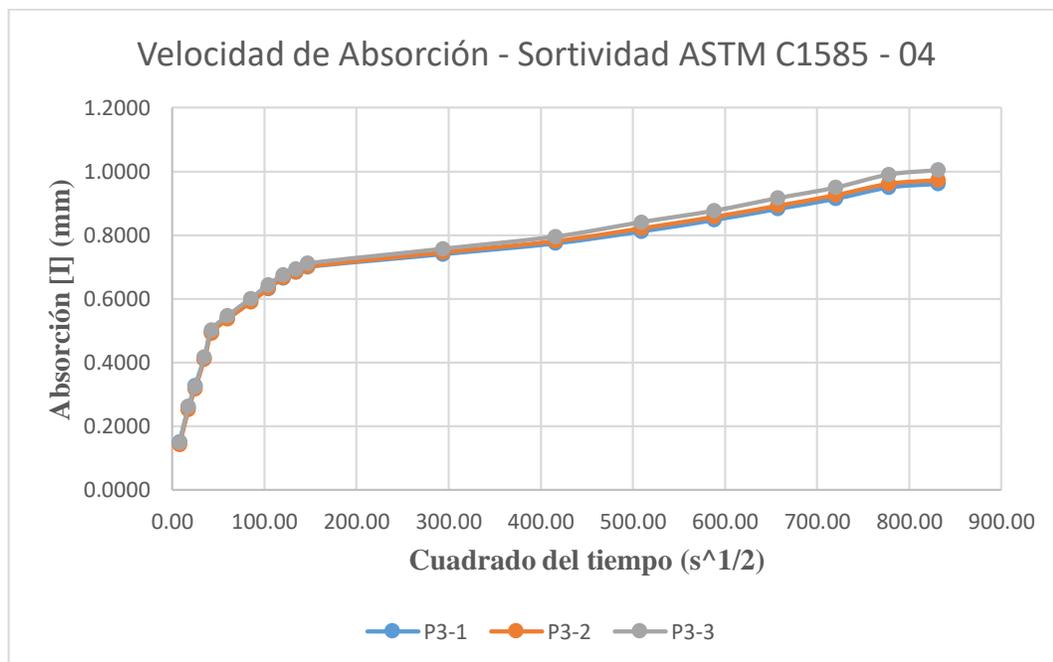
Las primeras tres muestras, correspondientes a las probetas patrón, esquematizadas como (P3.1 – P3.2 – P3.3), constituyen el parámetro comparativo respecto a las muestras que contienen reemplazo de residuos de fabricación de cemento. Los parámetros obtenidos de los ensayos realizados son los siguientes:

Tabla 3.20: Parámetros obtenidos en muestras patrón con relación a/c de 0,60.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
P3.1	0,7002	3,95E-03	0,9904	0,9610	3,81E-04	0,9823
P3.2	0,7017	4,02E-03	0,99	0,9731	3,97E-04	0,9856
P3.3	0,7106	4,04E-03	0,99	1,0034	4,28E-04	0,9848

Se puede observar que las muestras presentan un ajuste acorde a lo estipulado en la norma ASTM, contemplando que deberán superar un valor de 0,98, a su vez que la velocidad de absorción tanto inicial como secundaria, se encuentra en el rango aceptado por la red Durar, al sobrepasar el valor de $5,2 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$, considerado a la muestra patrón como un elemento durable, plausible a comparación con las demás muestras.

Figura 3.15: Gráfica de absorción en muestras patrón con relación a/c de 0,60.



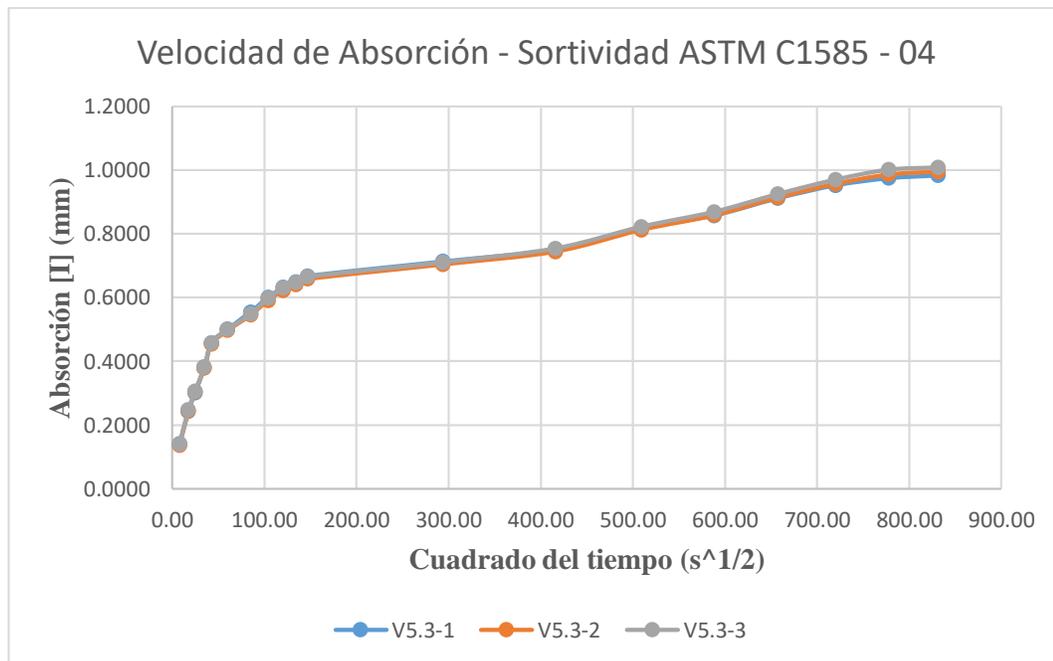
Muestras con reemplazo del 5%

Probetas ensayadas con un reemplazo parcial de cemento del 5%, obtuvieron los siguientes resultados, encontrando que la absorción inicial correspondiente a las primeras 6 horas de ensayo tuvo una reducción de 5,77%, mientras que la absorción secundaria incrementó en un 1,66% respecto de los datos obtenidos en las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,60, en la tabla 3.21 se observa que los valores de sortividad inicial y secundaria se encuentran por debajo del límite de $5,2 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$.

Tabla 3.21: Parámetros obtenidos en muestras con reemplazo del 5% y relación a/c de 0,60.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V5.3.1	0,6672	3,78E-03	0,9907	0,9833	4,62E-04	0,9806
V5.3.2	0,6583	3,75E-03	0,9925	0,9951	4,92E-04	0,9787
V5.3.3	0,6652	3,77E-03	0,9922	1,0080	5,01E-04	0,9789

Figura 3.16: Gráfica de absorción en muestras con reemp, del 5% y relación a/c de 0.60



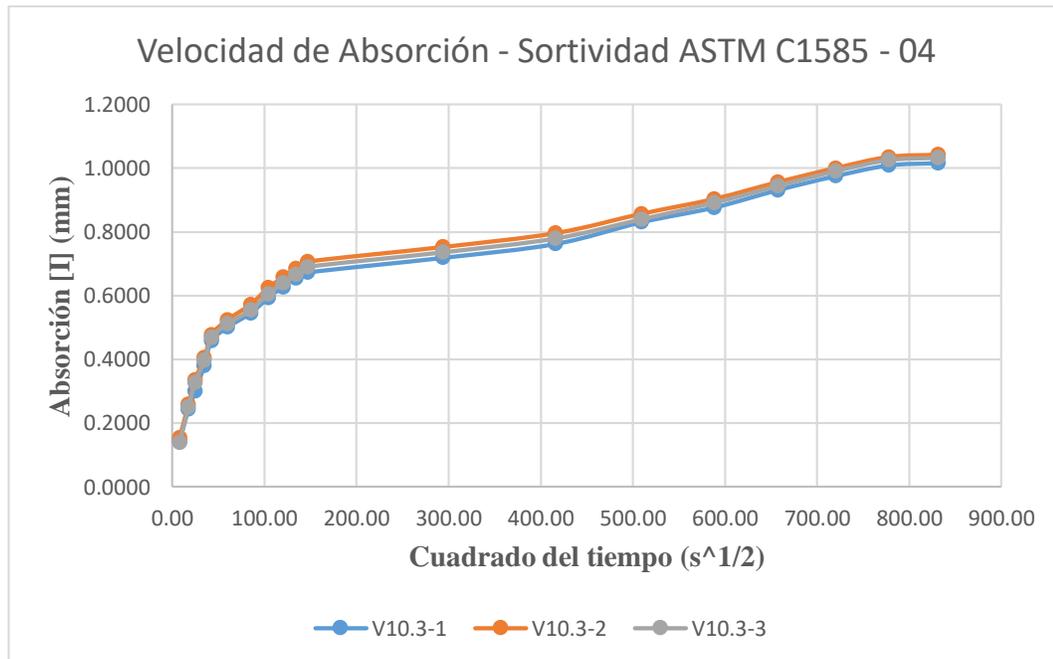
Muestras con reemplazo del 10%

Para las probetas elaboradas con un reemplazo parcial del cemento del 10% por fabricación de residuos de cemento, se determinó una reducción del 2,05% en la etapa inicial en absorción y un incremento del 5,20% en la etapa secundaria, por lo cual el reemplazo de residuos dio lugar a que las muestras de hormigón absorban mayor cantidad de agua a lo largo de la segunda etapa de ensayo, tal como se muestra en la tabla 3.22.

Tabla 3.22: Parámetros en muestras con reemplazo del 10% con relación a/c de 0,60.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V10.3.1	0,6730	3,82E-03	0,9884	1,0165	5,02E-04	0,9796
V10.3.2	0,7061	3,97E-03	0,9924	1,0417	4,90E-04	0,9797
V10.3.3	0,6900	3,96E-03	0,9928	1,0322	5,00E-04	0,9779

Figura 3.17: Gráfica de absorción en muestras con reemplazo del 10% con relación a/c de 0,60.



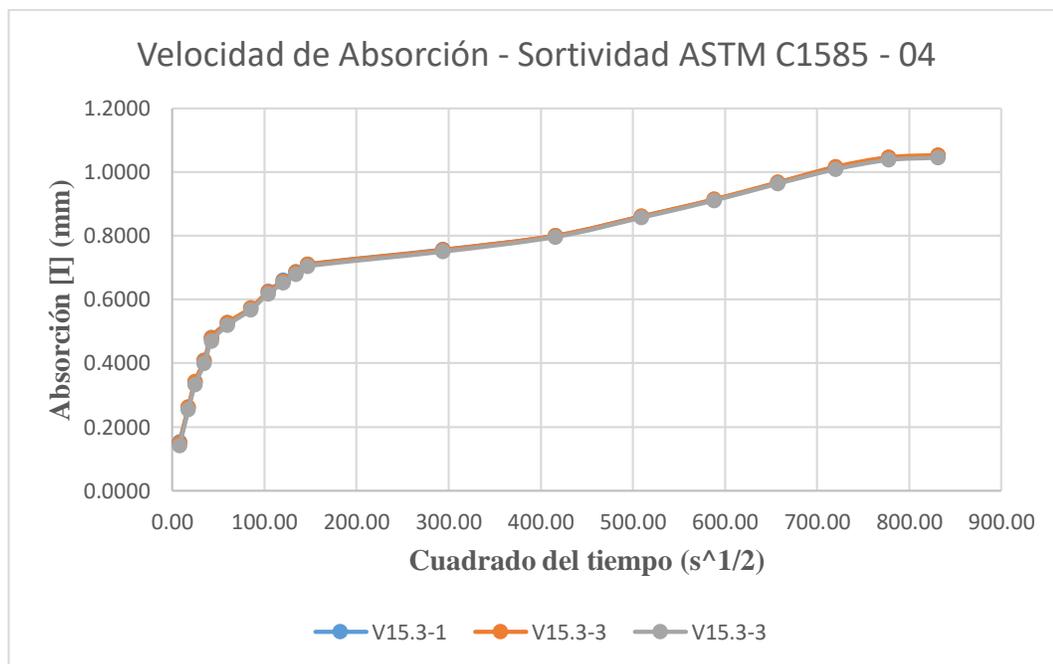
Muestras con reemplazo del 15%

Para probetas realizadas con un reemplazo parcial de cemento del 15% por residuos de fabricación de cemento, se determinó un incremento del 0,57% en la etapa inicial en absorción y un incremento del 7,23% en la etapa secundaria respecto de las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,60, lo que dio lugar a que las muestras de hormigón absorban mayor cantidad de agua a lo largo del ensayo, tal como se muestra en la tabla 3.23.

Tabla 3.23: Parámetros en muestras con reemplazo del 15% con relación a/c de 0,60.

Probeta	Inicial			Secundaria		
	Absorción	Sortividad	R ²	Absorción	Sortividad	R ²
	mm	mm/s ^{1/2}		mm	mm/s ^{1/2}	
V15.3.1	0,7107	4,00E-03	0,9925	1,0517	4,98E-04	0,9776
V15.3.2	0,7098	4,03E-03	0,9938	1,0538	5,03E-04	0,9778
V15.3.3	0,7042	4,04E-03	0,994	1,0445	4,97E-04	0,9795

Figura 3.18: Gráfica de absorción en muestras con reemplazo del 15% con relación a/c de 0,60.



3.5.4.- Penetración de agua bajo presión

En el caso del ensayo de penetración de agua bajo presión (UNE 12390 - 8), se ha realizado el ensayo en 36 muestras, contemplando tres probetas para cada combinación de relación agua/cemento (0,45 – 0,52 – 0,60) y tipo de muestras (Patrón – Reemplazo del 5% - Reemplazo del 10% - Reemplazo del 15%), fue necesario evaluar los valores máximos de penetración que se encuentren dado, que es un parámetro evaluable para la permeabilidad que tenga la probeta y por ende correlacionar la misma con la durabilidad.

Muestras con relación agua/cemento de 0,45

Primer lote de análisis, para lo cual han sido ensayadas 12 probetas, determinando la profundidad media y máxima de agua en cada una, posterior a realizar el ensayo de rotura lateral, las muestras han sido consistentes, debiendo desecharse los datos de una probeta con incorporación del 10% de residuo de fabricación de cemento debido a una fuga de agua.

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 3.24.

Tabla 3.24: Profundidades de penetración de agua con relación a/c de 0,45.

Tabla resumen			
Identificación	Prof. Media	Prof. Máxima	Prof. Promedio
	mm	mm	mm
A1-1	11	18	14,5
A1-2	13	16	14,5
A1-3	10	21	15,5
B1-1	13	22	17,5
B1-2	10	18	14
B1-3	12	17	14,5
C1-1	9	21	15
C1-2	-	-	-
C1-3	12	20	16
D1-1	13	18	15,5
D1-2	8	19	13,5
D1-3	10	23	16,5

La norma estipula un límite máximo de 30 mm en el caso de profundidad media y 50 mm en el caso de profundidad máxima, por lo tanto, en primera instancia, se puede

notar que las muestras se encuentran dentro de los rangos establecidos, sin embargo, habrá que recalcar que la probeta C1-2 ha sufrido una fuga durante el ensayo, por lo tanto, ha sido desechado el valor obtenido por dicha muestra.

En el caso de las muestras patrón (A1-1 – A1-2 – A1-3), serán el parámetro de análisis y comparación respecto a las muestras que contengan residuos de fabricación de cemento. Por lo tanto, cuando se analiza en valores promedio, se determina que las muestras con un reemplazo parcial del 5% (B1-1 – B1-2 – B1-3) presentan un incremento en la profundidad de agua media del 2,94% y en la profundidad máxima del 3,64% respecto de las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,45.

En el caso de las muestras que contienen un 10% de reemplazo en aglomerante que corresponden a la nomenclatura (C1-1 – C1-2 – C1-3), se tuvo que trabajar con 2 datos, debido a que se desechó un dato por fuga de agua, por lo tanto, con los datos restantes se determinó que la profundidad media se vio reducida en un 7,35% y la profundidad máxima se vio incrementada en un 11,82% respecto del promedio de las muestras patrón para el lote de relación agua/cemento de 0,45.

En el caso de las muestras que contienen un reemplazo del 15% y nombradas como (D1-1 – D1-2 – D1-3), se determinó que la profundidad media se vio reducida en un 8,82% y la profundidad máxima incrementó en un 9,09% respecto a las profundidades obtenidas en probetas patrón.

Al momento de evaluar, se encontró que la adición pudo reducir los valores de profundidad media, sin embargo, la profundidad máxima se vio incrementada, esto puede responder a la posibilidad de que en ciertas zonas de las probetas se generaron poros de un tamaño mayor a lo normal, por lo tanto, el flujo se vio incrementado.

Sin embargo, la profundidad media si puede reflejar un análisis más adecuado, debido a que corresponde a un criterio zonal y no puntual como es el caso de la profundidad máxima, por lo tanto, se determinó que la incorporación de residuos de fabricación de cemento con una finura menor a la del cemento, ha respondido correctamente al ser analizada una relación agua/cemento de 0,45.

Muestras con relación agua/cemento de 0,52

El segundo lote de análisis, con una relación agua/cemento mayor al primer lote de análisis, se espera que, al tener mayor porosidad, se observe un incremento en la profundidad media y máxima, los valores límite establecidos en la norma UNE EN 12390 – 8, establece un límite máximo de 50 mm en caso de la profundidad máxima y 30 mm para la profundidad media.

Los resultados se visualizan en la tabla 3.25:

Tabla 3.25: Profundidades de penetración de agua con relación a/c de 0,52.

Tabla resumen			
Identificación	Prof. Media	Prof. Máxima	Prof. Promedio
	mm	mm	mm
A2-1	14	24	19
A2-2	21	26	23,5
A2-3	16	21	18,5
B2-1	16	30	23
B2-2	15	27	21
B2-3	16	28	22
C2-1	13	24	18,5
C2-2	15	25	20
C2-3	17	28	22,5
D2-1	18	21	19,5
D2-2	15	24	19,5
D2-3	16	19	17,5

Los valores obtenidos en las muestras patrón (A2-1 – A2-2 – A2-3) comprenden los valores de análisis y comparación, al momento de evaluarlas respecto a las muestras que contienen reemplazos parciales de cemento por residuos de fabricación de cemento El Puente.

En el caso de las muestras con un reemplazo del 5% que responden a la nomenclatura (B2-1 – B2-2 – B2-3) se determinó una reducción del 7,84% en el caso de la profundidad media y un incremento del 11,27% en profundidad máxima, cuando se

comparan promedios respecto a las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,52.

Las muestras con un reemplazo parcial del 10% en aglomerante (C2-1 – C2-2 – C2-3) presentaron una reducción en la profundidad media del 11,76% y un incremento del 8,45% en el caso de la profundidad máxima respecto a las muestras patrón con relación agua/cemento de 0,52.

Finalmente, las muestras con un reemplazo parcial del 15% de residuos de fabricación del cemento, presentan una reducción del 3,92% en profundidad media respecto a las probetas patrón y una reducción del 9,86% en el caso de la profundidad máxima.

Muestras con relación agua/cemento de 0,60

El tercer lote de análisis correspondiente a muestras con una relación agua/cemento mayor a los dos primeros lotes de análisis, los valores límite establecidos en la norma UNE EN 12390 – 8, establece un límite máximo de 50 mm en caso de la profundidad máxima y 30 mm para la profundidad media.

Los resultados se visualizan en la tabla 3.26:

Tabla 3.26: Profundidades de penetración de agua con relación a/c de 0,60.

Tabla resumen			
Identificación	Prof. Media	Prof. Máxima	Prof. Promedio
	mm	mm	mm
A3-1	18	26	22
A3-2	15	28	21,5
A3-3	16	25	20,5
B3-1	14	29	21,5
B3-2	16	27	21,5
B3-3	21	30	25,5
C3-1	23	32	27,5
C3-2	15	28	21,5
C3-3	19	24	21,5
D3-1	16	27	21,5
D3-2	19	33	26
D3-3	18	41	29,5

Los valores obtenidos en las muestras patrón (A3-1 – A3-2 – A3-3) comprenden los valores de análisis y comparación, al momento de evaluarlas respecto a las muestras que contienen reemplazos parciales.

Las muestras compuestas por un reemplazo parcial de cemento del 5% por residuos de fabricación de cemento (B3-1 – B3-2 – B3-3), presentaron un incremento en un 4,08% en la profundidad de agua media, mientras que la profundidad máxima tuvo un incremento de 8,86% al comparar los valores promedio respecto a las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,60.

Las muestras con un reemplazo parcial del 10% en aglomerante (C3-1 – C3-2 – C3-3) presentaron un incremento en la profundidad media del 16,33% y un incremento del 6,33% en el caso de la profundidad máxima, respecto a las muestras patrón con una relación agua/cemento de 0,60.

Finalmente, las muestras con un reemplazo del 15% de residuos de fabricación del cemento, presentan un incremento del 8,16% en profundidad media respecto a las probetas patrón y un incremento del 27,85% en el caso de la profundidad máxima.

3.6.- Especificaciones técnicas del aditivo

Propiedades físicas. – El residuo de fabricación de cemento el puente se presenta como una arena o polvo muy fino, suave al tacto y de un color gris marrón más o menos claro, según la proporción de calcio, hierro y carbón sin quemar.

La finura media del residuo en estado bruto, es decir, sin moler, es comparable a la del cemento portland ordinario y su tamaño de grano oscila entre 0.2 y 200 micras de diámetro.

El contenido de humedad depende de la forma en que estas se depositen después de abandonar los filtros.

Su granulometría es semejante a la de un suelo limoso, entre un 80 y 95% de las partículas tienen tamaño limo. El porcentaje de partículas tamaño arcilla es muy pequeño o inexistente.

Propiedades químicas. – La composición química del residuo es muy variable dependiendo de la composición química del cemento empleado, los porcentajes en los que se presentan varían sustancialmente unas de otras.

En general poseen los siguientes componentes de mayor proporción:

Oxido de calcio (CaO) en porcentajes mayores al 50%,

Oxido de Silice (SiO₂) en porcentajes mayores al 5%,

Oxido de Aluminio (Al₂O₃) en porcentajes mayores al 4%

Óxido de Hierro (Fe₂O₃) en porcentajes mayores al 3%

Y en menores proporciones se encuentran:

Óxido de Magnesio (MgO),

Oxido de Sodio (Na₂O) y

Oxido de Potasio (K₂O),

Los cuales poseen porcentajes menores al 5% y posee perdidas por ignición.

3.7.- Análisis estadístico

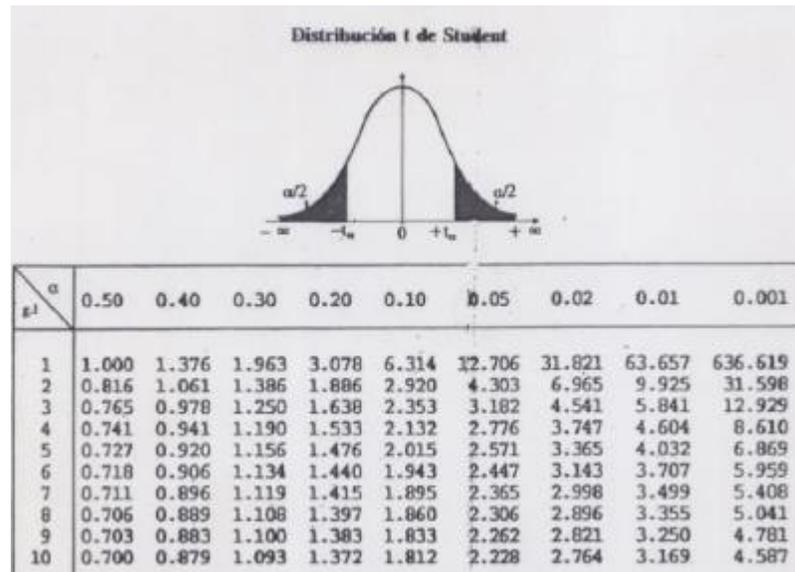
De manera general, en el contraste de hipótesis se parte de un supuesto de igualdad de los dos parámetros que queremos comparar, supuesto al que denominamos hipótesis nula. Una vez obtenidos los parámetros, calcularemos la probabilidad de que, bajo el supuesto de la hipótesis nula, la diferencia que observemos entre ellos sea debida a error aleatorio o de muestreo.

Si esta probabilidad es inferior a un determinado valor que, por convenio, suele situarse en 0,05, asumiremos que la probabilidad de que la diferencia se deba al azar es lo suficientemente baja como para rechazar la hipótesis nula y considerar como cierta la hipótesis alternativa de desigualdad (contraste bilateral) o de superioridad o inferioridad de uno de los parámetros (contraste unilateral).

Cuando queremos comparar dos parámetros de dos grupos diferentes, solemos utilizar un estadístico que se relacione con el parámetro y cuyos valores sigan una

distribución de probabilidad conocida. Así, los pasos para realizar la comparación serán siempre los mismos: establecer la hipótesis nula de igualdad de los parámetros, seleccionar el estadístico adecuado para cada situación, utilizar la distribución de probabilidad correspondiente para calcular la probabilidad de ese valor del estadístico que hemos empleado y, según este valor de probabilidad, decidimos en favor de la hipótesis nula o de la alternativa que hayamos elegido, unilateral o bilateral.

Tabla 3.27: Distribución t de Student.



Para brindar un mayor grado de confianza al trabajo elaborado, es necesario someter a los datos obtenidos de los ensayos realizados a un análisis estadístico, el cuál permita dar un grado de validez a los resultados.

Se hará uso de la metodología T-Student con medias comparativas, de tal forma que pueda contrastarse los datos obtenidos en las muestras patrón con aquellas que tienen grado de reemplazo de cemento por residuos de fabricación de cemento en porcentajes de 5, 10 y 15%

La metodología T-Student es un tipo de estadística deductiva. Se utiliza para determinar si hay diferencia significativa entre las medias de dos grupos.

Esta prueba compara las dos medias de una variable de resultado cuantitativo continuo obtenidas en dos categorías definidas por una variable cualitativa. Se basa en el

cálculo estadístico t, que tiene en cuenta la diferencia de medias a comparar y su error estándar, según la siguiente formula

$$\frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

Donde:

X_1 X_2 – Representa las medias para cada muestra.

S_1^2 S_2^2 – Desviación estándar elevada al cuadrado.

N_1 N_2 – Numero de datos para cada muestra.

También será necesario especificar la hipótesis alternativa e hipótesis nula con la cual trabajará la prueba estadística, al estar comparando las medias de diferentes grupos respecto a la muestra patrón, el objetivo será determinar si existe una dispersión significativa considerando el grado de significancia del 5%.

Por lo tanto, las hipótesis de contraste serán:

Hipótesis alternativa (H_1). - Los valores obtenidos se encuentran en un rango de dispersión contemplado para un 5% de significancia.

Hipótesis nula (H_0). - Los valores obtenidos no se encuentran en un rango de dispersión contemplado para un 5% de significancia.

Los resultados obtenidos del análisis estadístico son los siguientes:

Ensayo de resistencia a la compresión

Para realizar el análisis estadístico en los ensayos de resistencia a la compresión, se ha contemplado los valores de relación agua/cemento estudiados junto con los porcentajes de reemplazo de cemento por residuo de fabricación de cemento, con lo cual es posible realizar la compilación de datos y extraer las medias respectivas para cada caso, la desviación estándar y comparar los valores obtenidos de la prueba T-Student con el valor de frontera obtenido de la tabla de distribución el cual es tomado como referencia para medir la dispersión.

Muestras de ensayo de resistencia a la compresión – A/C de 0.45:

Las muestras de resistencia con relación agua/cemento de 0.45 no cumplen con la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de 3.573, 9.015 y 12.940 respectivamente, mostrando incrementos respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 4 grados de libertad es 2.776 por lo tanto se acepta la hipótesis nula para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de resistencia a la compresión con relación agua/cemento de 0.45 se encuentran en los anexos 129, 130 y 131 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la resistencia a la compresión disminuyó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho menor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.28: Análisis Estadístico para ensayo de resistencia a la compresión con A/C de 0.45

Ensayo de Resistencia - Muestras con A/C de 0.45							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
413.05	Kg/cm2	384.43	Kg/cm2	370.50	Kg/cm2	351.99	Kg/cm2
397.56	Kg/cm2	384.62	Kg/cm2	358.69	Kg/cm2	354.56	Kg/cm2
391.36	Kg/cm2	392.89	Kg/cm2	363.56	Kg/cm2	346.45	Kg/cm2
400.04	Kg/cm2	373.40	Kg/cm2	358.54	Kg/cm2	349.92	Kg/cm2
398.20	Kg/cm2	376.37	Kg/cm2	356.31	Kg/cm2	347.36	Kg/cm2
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
400.04	Kg/cm2	382.34	Kg/cm2	361.52	Kg/cm2	350.05	Kg/cm2
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
7.972	S1	7.688	S2	5.674	S3	3.327	S4
t		to		to		to	
2.776		3.573		9.015		12.940	
Referencia		Hip. Nula		Hip. Nula		Hip. Nula	

Muestras de ensayo de resistencia a la compresión – A/C de 0.52:

Las muestras de resistencia con relación agua/cemento de 0.52 no cumplen con la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de 8.702, 13.911 y 19.628 respectivamente, mostrando incrementos respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 4 grados de libertad es 2.776 por lo tanto se acepta la hipótesis nula para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de resistencia a la compresión con relación agua/cemento de 0.52 se encuentran en los anexos 131, 132 y 133 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la resistencia a la compresión disminuyó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho menor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.29: Análisis Estadístico para ensayo de resistencia a la compresión con A/C de 0.52

Ensayo de Resistencia - Muestras con A/C de 0.52							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
347.02	Kg/cm ²	325.34	Kg/cm ²	314.42	Kg/cm ²	297.58	Kg/cm ²
343.16	Kg/cm ²	324.09	Kg/cm ²	308.46	Kg/cm ²	290.67	Kg/cm ²
350.58	Kg/cm ²	313.49	Kg/cm ²	301.53	Kg/cm ²	298.25	Kg/cm ²
353.34	Kg/cm ²	322.05	Kg/cm ²	306.60	Kg/cm ²	289.53	Kg/cm ²
355.70	Kg/cm ²	312.63	Kg/cm ²	305.92	Kg/cm ²	294.52	Kg/cm ²
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
349.96	Kg/cm ²	319.52	Kg/cm ²	307.39	Kg/cm ²	294.11	Kg/cm ²
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
4.992	S1	6.022	S2	4.681	S3	3.945	S4
t		to		to		to	
2.776		8.702		13.911		19.628	
Referencia		Hip. Nula		Hip. Nula		Hip. Nula	

Muestras de ensayo de resistencia a la compresión – A/C de 0.60:

Las muestras de resistencia con relación agua/cemento de 0.60 no cumplen con la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de 6.122, 9.739 y 11.646 respectivamente, mostrando incrementos respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 4 grados de libertad es 2.776 por lo tanto se acepta la hipótesis nula para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de resistencia a la compresión con relación agua/cemento de 0.60 se encuentran en los anexos 133, 134 y 135 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la resistencia a la compresión disminuyó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho menor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.30: Análisis Estadístico para ensayo de resistencia a la compresión con A/C de 0.60

Ensayo de Resistencia - Muestras con A/C de 0.60							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
317.42	Kg/cm ²	307.77	Kg/cm ²	300.92	Kg/cm ²	285.42	Kg/cm ²
319.75	Kg/cm ²	305.60	Kg/cm ²	294.60	Kg/cm ²	289.08	Kg/cm ²
320.59	Kg/cm ²	303.27	Kg/cm ²	299.59	Kg/cm ²	283.11	Kg/cm ²
312.34	Kg/cm ²	306.44	Kg/cm ²	297.56	Kg/cm ²	278.67	Kg/cm ²
314.47	Kg/cm ²	300.92	Kg/cm ²	295.07	Kg/cm ²	274.57	Kg/cm ²
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
316.91	Kg/cm ²	304.80	Kg/cm ²	297.55	Kg/cm ²	282.17	Kg/cm ²
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
3.490	S1	2.717	S2	2.755	S3	5.684	S4
t		to		to		to	
2.776		6.122		9.739		11.646	
Referencia		Hip. Nula		Hip. Nula		Hip. Nula	

Muestras de ensayo de velocidad de absorción – A/C de 0.45 – Etapa primaria:

Las muestras de velocidad de absorción en etapa primaria con relación agua/cemento de 0.45 no cumple en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -2.387, -4.770 y -4.983 respectivamente, mostrando incrementos para los reemplazos del 10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para un reemplazo de 5% e hipótesis nula para el grado de reemplazo de 10 y 15%.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de velocidad de absorción en etapa primaria con relación agua/cemento de 0.45 se encuentran en los anexos 136, 137 y 138 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la velocidad de absorción aumentó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho mayor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.33: Análisis Estadístico para ensayo de velocidad de absorción en etapa primaria con A/C de 0.45.

Ensayo de Velocidad de Absorción - Muestras con A/C de 0.45 - Etapa primaria							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
0.1185	mm/s ^{1/2}	0.1363	mm/s ^{1/2}	0.1499	mm/s ^{1/2}	0.1522	mm/s ^{1/2}
0.1335	mm/s ^{1/2}	0.1444	mm/s ^{1/2}	0.1558	mm/s ^{1/2}	0.1593	mm/s ^{1/2}
0.1332	mm/s ^{1/2}	0.1463	mm/s ^{1/2}	0.1558	mm/s ^{1/2}	0.1609	mm/s ^{1/2}
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
0.1284	mm/s ^{1/2}	0.1423	mm/s ^{1/2}	0.1539	mm/s ^{1/2}	0.1575	mm/s ^{1/2}
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
0.009	S1	0.005	S2	0.003	S3	0.005	S4
t		to		to		to	
4.303		-2.387		-4.770		-4.983	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Nula		Hip. Nula	

Muestras de ensayo de velocidad de absorción – A/C de 0.45 – Etapa secundaria:

Las muestras de velocidad de absorción en etapa secundaria con relación agua/cemento de 0.45 no cumple en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -2.786, -4.469 y -4.478 respectivamente, mostrando incrementos para los reemplazos del 10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para un reemplazo de 5% e hipótesis nula para el grado de reemplazo de 10 y 15%.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de velocidad de absorción en etapa secundaria con relación agua/cemento de 0.45 se encuentran en los anexos 138, 139 y 140 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la velocidad de absorción aumentó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho mayor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.34: Análisis Estadístico para ensayo de velocidad de absorción en etapa secundaria con A/C de 0.45.

Ensayo de Velocidad de Absorción - Muestras con A/C de 0.45 - Etapa secundaria							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
0.1584	mm/s ^{1/2}	0.1878	mm/s ^{1/2}	0.2001	mm/s ^{1/2}	0.1991	mm/s ^{1/2}
0.1774	mm/s ^{1/2}	0.1933	mm/s ^{1/2}	0.2054	mm/s ^{1/2}	0.2094	mm/s ^{1/2}
0.1797	mm/s ^{1/2}	0.1927	mm/s ^{1/2}	0.2029	mm/s ^{1/2}	0.2118	mm/s ^{1/2}
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
0.1718	mm/s ^{1/2}	0.1913	mm/s ^{1/2}	0.2028	mm/s ^{1/2}	0.2068	mm/s ^{1/2}
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
0.012	S1	0.003	S2	0.003	S3	0.007	S4
t		to		to		to	
4.303		-2.786		-4.469		-4.478	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Nula		Hip. Nula	

Muestras de ensayo de velocidad de absorción – A/C de 0.52 – Etapa primaria:

Las muestras de velocidad de absorción en etapa primaria con relación agua/cemento de 0.52 no cumple en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -3.082, -3.336 y -11.469 respectivamente, mostrando incremento para el reemplazo del 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para un reemplazo de 5 y 10% e hipótesis nula para el grado de reemplazo de 15%.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de velocidad de absorción en etapa primaria con relación agua/cemento de 0.52 se encuentran en los anexos 140, 141 y 142 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la velocidad de absorción aumentó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho mayor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.35: Análisis Estadístico para ensayo de velocidad de absorción en etapa primaria con A/C de 0.52.

Ensayo de Velocidad de Absorción - Muestras con A/C de 0.52 - Etapa primaria							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
0.2366	mm/s ^{1/2}	0.2957	mm/s ^{1/2}	0.2942	mm/s ^{1/2}	0.4011	mm/s ^{1/2}
0.2624	mm/s ^{1/2}	0.2903	mm/s ^{1/2}	0.2983	mm/s ^{1/2}	0.3973	mm/s ^{1/2}
0.2765	mm/s ^{1/2}	0.3014	mm/s ^{1/2}	0.3126	mm/s ^{1/2}	0.4138	mm/s ^{1/2}
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
0.2585	mm/s ^{1/2}	0.2958	mm/s ^{1/2}	0.3017	mm/s ^{1/2}	0.4041	mm/s ^{1/2}
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
0.020	S1	0.006	S2	0.010	S3	0.009	S4
t		to		to		to	
4.303		-3.082		-3.336		-11.469	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Nula	

Muestras de ensayo de velocidad de absorción – A/C de 0.52 – Etapa secundaria:

Las muestras de velocidad de absorción en etapa secundaria con relación agua/cemento de 0.52 no cumple la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -5.920, -8.336 y -20.384 respectivamente, mostrando incrementos para los reemplazo del 5, 10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis nula para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de velocidad de absorción en etapa secundaria con relación agua/cemento de 0.52 se encuentran en los anexos 143, 144 y 145 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la velocidad de absorción aumentó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho mayor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.36: Análisis Estadístico para ensayo de velocidad de absorción en etapa secundaria con A/C de 0.52.

Ensayo de Velocidad de Absorción - Muestras con A/C de 0.52 - Etapa secundaria							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
0.2913	mm/s ^{1/2}	0.3765	mm/s ^{1/2}	0.4085	mm/s ^{1/2}	0.5437	mm/s ^{1/2}
0.3167	mm/s ^{1/2}	0.3826	mm/s ^{1/2}	0.4153	mm/s ^{1/2}	0.5338	mm/s ^{1/2}
0.3246	mm/s ^{1/2}	0.4034	mm/s ^{1/2}	0.4361	mm/s ^{1/2}	0.5523	mm/s ^{1/2}
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
0.3109	mm/s ^{1/2}	0.3875	mm/s ^{1/2}	0.4200	mm/s ^{1/2}	0.5433	mm/s ^{1/2}
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
0.017	S1	0.014	S2	0.014	S3	0.009	S4
t		to		to		to	
4.303		-5.92		-8.366		-20.384	
Referencia		Hip. Nula		Hip. Nula		Hip. Nula	

Muestras de ensayo de velocidad de absorción – A/C de 0.60 – Etapa primaria:

Las muestras de velocidad de absorción en etapa primaria con relación agua/cemento de 0.60 no cumple en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de 9.644, 1.433 y -1.047 respectivamente, mostrando incremento para el reemplazo del 5% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para un reemplazo de 10 y 15% e hipótesis nula para el grado de reemplazo de 5%.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de velocidad de absorción en etapa primaria con relación agua/cemento de 0.60 se encuentran en los anexos 145, 146 y 147 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la velocidad de absorción aumentó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho mayor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.37: Análisis Estadístico para ensayo de velocidad de absorción en etapa primaria con A/C de 0.60.

Ensayo de Velocidad de Absorción - Muestras con A/C de 0.60 - Etapa primaria							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
0.7002	mm/s ^{1/2}	0.6672	mm/s ^{1/2}	0.6730	mm/s ^{1/2}	0.7107	mm/s ^{1/2}
0.7017	mm/s ^{1/2}	0.6583	mm/s ^{1/2}	0.7061	mm/s ^{1/2}	0.7098	mm/s ^{1/2}
0.7106	mm/s ^{1/2}	0.6652	mm/s ^{1/2}	0.6900	mm/s ^{1/2}	0.7042	mm/s ^{1/2}
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
0.7042	mm/s ^{1/2}	0.6636	mm/s ^{1/2}	0.6897	mm/s ^{1/2}	0.7082	mm/s ^{1/2}
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
0.006	S1	0.005	S2	0.017	S3	0.004	S4
t		to		to		to	
4.303		9.644		1.433		-1.047	
Referencia		Hip. Nula		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo de velocidad de absorción – A/C de 0.60 – Etapa secundaria:

Las muestras de velocidad de absorción en etapa secundaria con relación agua/cemento de 0.60 no cumple en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -1.122, -3.490 y -5.471 respectivamente, mostrando incremento para el reemplazo del 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para un reemplazo de 5 y 10% e hipótesis nula para el grado de reemplazo de 15%.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras de ensayo de velocidad de absorción en etapa secundaria con relación agua/cemento de 0.60 se encuentran en los anexos 147, 148 y 149 con un mayor desglose de datos.

Se determinó un incremento los valores “t” de student a mayor grado de reemplazo de cemento por residuo de cemento, dado que la velocidad de absorción aumentó con mayores niveles de reemplazo, generando de esta forma que la media obtenida sea mucho mayor a la media en la muestra patrón.

Tabla 3.38: Análisis Estadístico para ensayo de velocidad de absorción en etapa secundaria con A/C de 0.60.

Ensayo de Velocidad de Absorción - Muestras con A/C de 0.60 - Etapa secundaria							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
0.9610	mm/s ^{1/2}	0.9833	mm/s ^{1/2}	1.0165	mm/s ^{1/2}	1.0517	mm/s ^{1/2}
0.9731	mm/s ^{1/2}	0.9951	mm/s ^{1/2}	1.0417	mm/s ^{1/2}	1.0538	mm/s ^{1/2}
1.0034	mm/s ^{1/2}	1.0080	mm/s ^{1/2}	1.0322	mm/s ^{1/2}	1.0445	mm/s ^{1/2}
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
0.9792	mm/s ^{1/2}	0.9955	mm/s ^{1/2}	1.0301	mm/s ^{1/2}	1.0500	mm/s ^{1/2}
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
0.022	S1	0.012	S2	0.013	S3	0.005	S4
t		to		to		to	
4.303		-1.122		-3.490		-5.471	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Nula	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.45 – Penetración media:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.45 respecto a la penetración media cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -0.267, 0.225 y 0.588 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua media bajo presión con relación agua/cemento de 0.45 se encuentran en los anexos 150, 151 y 152 con un mayor desglose de datos.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.39: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua media bajo presión con A/C de 0.45.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.45 - Penetración media							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
11	mm	13	mm	9	mm	13	mm
13	mm	10	mm	-	mm	8	mm
10	mm	12	mm	12	mm	10	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
11.33	mm	11.67	mm	10.50	mm	10.33	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
1.53	S1	1.53	S2	6.24	S3	2.52	S4
t		to		to		to	
4.303		-0.267		0.225		0.588	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.45 – Penetración máxima:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.45 respecto a la penetración máxima cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -0.316, -0.310 y -0.791 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua máxima bajo presión con relación agua/cemento de 0.45 se encuentran en los anexos 152, 153 y 154.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.40: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua máxima bajo presión con A/C de 0.45.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.45 - Penetración máxima							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
18	mm	22	mm	21	mm	18	mm
16	mm	18	mm	-	mm	19	mm
21	mm	17	mm	20	mm	23	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
18.33	mm	19.00	mm	20.50	mm	20.00	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
2.52	S1	2.65	S2	11.85	S3	2.65	S4
t		to		to		to	
4.303		-0.316		-0.310		-0.791	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.45 – Penetración promedio:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.45 respecto a la penetración promedio cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -0.438, -0.129 y -0.354 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua promedio bajo presión con relación agua/cemento de 0.45 se encuentran en los anexos 154, 155 y 156 con un mayor desglose de datos.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.41: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua promedio bajo presión con A/C de 0.45.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.45 - Penetración promedio							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
15	mm	18	mm	15	mm	16	mm
15	mm	14	mm	-	mm	14	mm
16	mm	15	mm	16	mm	17	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
14.83	mm	15.33	mm	15.50	mm	15.17	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
0.58	S1	1.89	S2	8.96	S3	1.53	S4
t		to		to		to	
4.303		-0.438		-0.129		-0.354	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.52 – Penetración media:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.52 respecto a la penetración media cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de 0.632, 0.840 y 0.295 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua media bajo presión con relación agua/cemento de 0.52 se encuentran en los anexos 157, 158 y 159.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.42: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua promedio bajo presión con A/C de 0.52.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.52 - Penetración media							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
14	mm	16	mm	13	mm	18	mm
21	mm	15	mm	15	mm	15	mm
16	mm	16	mm	17	mm	16	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
17.00	mm	15.67	mm	15.00	mm	16.33	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
3.61	S1	0.58	S2	2.00	S3	1.53	S4
t		to		to		to	
4.303		0.632		0.840		0.295	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.52 – Penetración máxima:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.52 respecto a la penetración máxima cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -1.569, -1.061 y 1.136 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua máxima bajo presión con relación agua/cemento de 0.52 se encuentran en los anexos 159, 160 y 161 con un mayor desglose de datos.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.42: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua máxima bajo presión con A/C de 0.52.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.52 - Penetración máxima							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
24	mm	25	mm	24	mm	21	mm
26	mm	26	mm	25	mm	24	mm
21	mm	28	mm	28	mm	19	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
23.67	mm	26.33	mm	25.67	mm	21.33	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
2.52	S1	1.53	S2	2.08	S3	2.52	S4
t		to		to		to	
4.303		-1.569		-1.061		1.136	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.52 – Penetración promedio:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.52 respecto a la penetración promedio cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -0.400, 0.000 y 0.870 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua promedio bajo presión con relación agua/cemento de 0.52 se encuentran en los anexos 161, 162 y 163.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.43: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua promedio bajo presión con A/C de 0.52.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.52 - Penetración promedio							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
19	mm	21	mm	19	mm	20	mm
24	mm	21	mm	20	mm	20	mm
19	mm	22	mm	23	mm	18	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
20.33	mm	21.00	mm	20.33	mm	18.83	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
2.75	S1	0.87	S2	2.02	S3	1.15	S4
t		to		to		to	
4.303		-0.400		0.000		0.870	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.60 – Penetración media:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.60 respecto a la penetración media cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -0.295, -1.079 y -1.069 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua media bajo presión con relación agua/cemento de 0.60 se encuentran en los anexos 164, 165 y 166.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.44: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua media bajo presión con A/C de 0.60.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.60 - Penetración media							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
18	mm	14	mm	23	mm	16	mm
15	mm	16	mm	15	mm	19	mm
16	mm	21	mm	19	mm	18	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
16.33	mm	17.00	mm	19.00	mm	17.67	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
1.53	S1	3.61	S2	4.00	S3	1.53	S4
t		to		to		to	
4.303		-0.295		-1.079		-1.069	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.60 – Penetración máxima:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.60 respecto a la penetración máxima cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -1.871, -0.674 y -1.767 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua máxima bajo presión con relación agua/cemento de 0.60 se encuentran en los anexos 166, 167 y 168 con un mayor desglose de datos.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.45: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua máxima bajo presión con A/C de 0.60.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.60 - Penetración máxima							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
26	mm	29	mm	32	mm	27	mm
28	mm	27	mm	28	mm	33	mm
25	mm	30	mm	24	mm	41	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
26.33	mm	28.67	mm	28.00	mm	33.67	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
1.53	S1	1.53	S2	4.00	S3	7.02	S4
t		to		to		to	
4.303		-1.871		-0.674		-1.767	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

Muestras de ensayo para penetración de agua bajo presión – A/C de 0.60 – Penetración promedio:

Las muestras para penetración de agua bajo presión con relación agua/cemento de 0.60 respecto a la penetración promedio cumplen en la totalidad la hipótesis alternativa que indica que se encuentran dentro del rango de frontera para un grado de significancia del 5%, dado que los valores obtenidos con un reemplazo del 5,10 y 15% son de -1.068, -1.058 y -1.838 respectivamente, mostrando reducción para los reemplazos del 5,10 y 15% respecto al valor de referencia que trabajando con un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad es 4.303 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa para los 3 grados de reemplazo.

Las gráficas de curva de gauss y delimitación de los valores para la distribución t-student en muestras para penetración de agua promedio bajo presión con relación agua/cemento de 0.60 se encuentran en los anexos 168, 169 y 170 con un mayor desglose de datos.

Se determinó una estabilidad en los valores “t” de student dado que las medias resultantes de los valores con reemplazo se asemejan a los obtenidos en la muestra patrón.

Tabla 3.46: Análisis Estadístico para ensayo de penetración de agua promedio bajo presión con A/C de 0.60.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión - Muestras con A/C de 0.60 - Penetración promedio							
Patrón		Reemplazo 5%		Reemplazo 10%		Reemplazo 15%	
22.0	mm	21.5	mm	27.5	mm	21.5	mm
21.5	mm	21.5	mm	21.5	mm	26.0	mm
20.5	mm	25.5	mm	21.5	mm	29.5	mm
Media - X1		Media - X2		Media - X3		Media - X4	
21.33	mm	22.83	mm	23.50	mm	25.67	mm
Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar		Desviación Estándar	
0.76	S1	2.31	S2	3.46	S3	4.01	S4
t		to		to		to	
4.303		-1.068		-1.058		-1.838	
Referencia		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa		Hip. Alternativa	

3.7.1.- Resultados del análisis estadístico

Ensayo de Resistencia a la compresión. – Para los 3 grados de reemplazo empleados 5,10 y 15% junto con las relaciones agua cemento de 0.45, 0.52 y 0.60 se puede notar que existe una dispersión significativa, los puntos obtenidos mediante la prueba t-student se encuentran en la zona de rechazo, lo cual indica que cumplen la hipótesis nula.

Considerando que al emplear un grado de significancia del 5% y 4 grados de libertad, se tiene un límite de ± 2.776 , todos los datos obtenidos de realizar la media comparativa entre las diferentes combinaciones y la muestra patrón, se encuentran fuera del rango respectivo.

Ensayo de Velocidad de absorción. – Con una relación agua/cemento de 0.45 y 0.52 se determinó que predomina la hipótesis nula, generando una dispersión tanto en la etapa primaria correspondiente a las primeras 6 horas como en la etapa secundaria correspondiente a la primera semana, en el caso de la relación agua cemento de 0.60, los datos cumplen con la hipótesis alternativa por lo cual los datos obtenidos poseen una dispersión menor.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión.- Los datos obtenidos para las relaciones agua/cemento de 0.45, 0.52 y 0.60 en conjunto con los grados de reemplazo de 5, 10 y 15% al realizar la prueba t-student en medias comparativas, permiten determinar que existe una dispersión dentro del rango de aceptación, por lo tanto los datos se ajustan a lo establecido en la hipótesis alternativa que indica que existe un rango aceptable de disparidad entre datos, tanto en datos obtenidos en la etapa media, máxima y promedio.

Ensayo de Penetración de agua bajo presión. – Los resultados obtenidos en la prueba de penetración de agua, habiendo analizado los datos para la etapa media, máxima y promedio, en conjunto con las combinaciones de relación agua/cemento y porcentaje de reemplazo de residuo, permiten determinar que la dispersión obtenida mediante la prueba t-students en medias comparativas, se encuentra dentro del rango de aceptación tomando en cuenta un grado de significancia del 5% y 2 grados de libertad, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

CONCLUSIONES

Los análisis realizados en las muestras, nos llevan a concluir lo siguiente:

La hipótesis planteada se cumple con la incorporación de un máximo de 5% de residuos de fabricación de cemento, dado que las características obtenidas en los ensayos se asemejan a los obtenidos en las muestras patrón, sin embargo, al incorporar mayores porcentajes de reemplazo, la diferencia es significativa.

La resistencia a la compresión del hormigón reduce un 3.82%, 6.11% y un 12.5% al emplear 5, 10 y 15% de residuos de fabricación respectivamente, esto se atribuye a la baja adherencia de las partículas de residuos con el resto de los componentes del hormigón. El efecto en la resistencia a la compresión puede ser aminorado si se emplean valores menores al 5% de residuos de fabricación de cemento.

Debido a su morfología y a una baja adherencia con el resto de materiales, la sustitución parcial de cemento por partículas de residuos de fabricación de cemento en el hormigón, genera porosidad interna en la matriz, por lo tanto, se determinó que la velocidad de absorción aumenta en un 1.66%, 5.20% y 7.23% al sustituir parcialmente el cemento en 5, 10 y 15% por partículas de residuos de fabricación de cemento.

Los datos obtenidos en el ensayo de penetración de agua bajo presión no presentan una consistencia acorde a los resultados esperados, pudiendo deberse a la manipulación de las muestras y la ejecución del ensayo, sin embargo, se determinó que la penetración media incrementó un 2.94% con un reemplazo parcial del 5%, redujo un 7.84% con un reemplazo del 10% y tuvo un incremento del 4.08% al emplear una sustitución del 15%.

En base de los resultados obtenidos del ensayo de velocidad de absorción y penetración de agua bajo presión se puede concluir que, la relación agua/cemento influye de forma directa en la permeabilidad, volviendo al hormigón más susceptible al paso del agua mientras esta sea mayor, por lo tanto, a menor relación agua/cemento, menor profundidad de penetración de agua bajo presión y por lo tanto menor permeabilidad en el concreto, lo que influye directamente en la durabilidad.

El empleo de residuos de fabricación de cemento en la matriz del hormigón en porcentajes mayores al 5% generan una disminución en los parámetros de velocidad de absorción y penetración de agua bajo presión, los cuales están siendo empleados como indicadores de durabilidad, por lo tanto, es posible determinar que su uso resultar perjudicial al emplear cantidades significativas en reemplazo del cemento.

Debido a que la durabilidad del hormigón está referida a resistir acciones físicas, ataques químicos y exposición ambiental, se puede concluir que empleando una relación agua/cemento baja en conjunto con una granulometría adecuada, es posible contrarrestar gran parte de acciones perjudiciales para el hormigón.

La adición de residuos de fabricación de cemento “El Puente” a la matriz de hormigón en calidad de reemplazo del cemento, influye en las características físicas del hormigón, por lo tanto, debe limitarse su uso con la finalidad de no comprometer la durabilidad del hormigón.