

Primera entrega

por Aleksey Beresovsky De Las Casas

Fecha de entrega: 28-mar-2023 11:46a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2049166631

Nombre del archivo: TRABAJO_DE_INVESTIGACION_-_Aleksey_Beresovsky_1.pdf (1.49M)

Total de palabras: 18286

Total de caracteres: 87861

Evaluación experimental de la permeabilidad del concreto basado en el cambio de la relación pasta de cemento vs. cantidad de agregado. Caso de estudio con cementos y agregados peruanos.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Palabras clave:

Concreto

Relación agua vs. cemento

Resultados experimentales

Relación pasta de cemento

Durabilidad del concreto

ABSTRACTO

La permeabilidad del concreto constituye una de las propiedades más importantes de este material, en particular porque condiciona la durabilidad y vida útil de las estructuras de concreto armado. Sin embargo, esta propiedad no es del todo comprendida por los constructores y otros interesados del ámbito de la construcción, en parte por no ser común la medición de la permeabilidad en la mayoría de las obras de edificación y en parte por desconocimiento de los mecanismos que la gobiernan.

Este trabajo presenta evidencia experimental del cambio de la permeabilidad en probetas de concreto cuyos diseños de mezcla tienen relaciones agua entre cemento fijas. Se concluye en la necesidad de ampliar los parámetros de control de diseño de mezcla para restringir la permeabilidad del concreto con mayor efectividad.

1. Introducción

Desde la creación del concreto moderno, ha existido la preocupación por el deterioro que sufren las estructuras fabricadas con este material durante su vida útil, especialmente en ambientes con presencia de sustancias químicas agresivas al concreto. El problema se hizo más complejo con la introducción del concreto armado, al incorporarse acero de refuerzo, surgiendo una nueva patología: la corrosión [1], la cual deteriora no solo al propio concreto al generar fisuras en la masa por la expansión del óxido de hierro, sino que también compromete la funcionalidad estructural al reducir la adherencia entre el acero y el concreto [2,3].

Al progresar la técnica de los diseños de mezcla para concreto, se establecen las primeras relaciones entre la permeabilidad y los problemas de durabilidad por deterioro del material y/o los daños a los elementos embebidos en este (acero de refuerzo) [1]. En esta línea, las investigaciones iniciales relacionaron la propiedad de permeabilidad con la densidad de la pasta de cemento, la cual se vinculaba a su vez con la relación agua/cemento [4]. Dado que existe una correspondencia entre la permeabilidad y la relación agua entre cemento, se adoptó esta última como parámetro de referencia para determinar el grado de permeabilidad y consecuentemente la durabilidad del concreto.

Si bien este parámetro ha funcionado en un inicio, en las últimas décadas la introducción de adiciones cementicias y la tecnología de los aditivos, en particular aditivos reductores de agua y superplastificantes, ha ido cambiando en la práctica la naturaleza de la pasta de cemento en el concreto, alejándola de la relación tradicional entre la densidad y estructura capilar, con la relación agua/cemento (en adelante relación a/c) [5-6]. En efecto, el uso de aditivos reductores de agua permite, mediante la reducción del agua en la mezcla, reducir la cantidad de poros capilares que se forman, a pesar de mantener la misma relación a/c, siendo la única limitación la potencia del aditivo y el costo de la mezcla [7]. Incluso existen actualmente aditivos que operan por acción cristalina hidrofílica que activamente reducen el diámetro interno de los capilares en la pasta cementicia, reduciendo la permeabilidad del concreto, independiente de la relación a/c del concreto [8].

El concepto por tanto de mantener la vinculación directa entre el parámetro relación a/c y la permeabilidad del concreto resulta, en el mejor de los casos, impreciso dado el avance tecnológico disponible para generar matrices con mayor densidad, independiente de las cantidades de cemento y agua empleados. De hecho, existen beneficios en el concreto al reducir la cantidad de cemento en la mezcla (la reducción de contracción, por ejemplo), sin mencionar las adiciones cementicias suplementarias, donde 4 de dichas adiciones están reconocidas en el reglamento peruano: puzolanas, escorias de altos hornos, microsílíce y ceniza volante, y se permite incorporar las cantidades de estas dentro del cálculo de la relación a/c [9].

Las especificaciones técnicas de los proyectos en Perú apelan generalmente a la relación a/c para determinar la permeabilidad del concreto. Sin embargo, en los últimos años se hizo notorio que para una misma especificación se presentaban diferentes propuestas de diseños de mezcla, debido que los contratistas de obra emplean cada uno una base tecnológica diferente y por tanto las cantidades de agua y cemento propuestos por cada uno de ellos también difieren, a pesar de cumplir con el requisito de relación a/c. La adopción de los métodos de medición por parte de los especificadores hizo más confuso el problema dado que las lecturas entre métodos de ensayo diferentes también discrepan significativamente entre sí para una misma muestra de concreto e incluso se generan inconsistencias en los resultados [10].

Estos problemas prácticos en las obras de construcción de los últimos años comienzan a evidenciar, si bien empíricamente, que el parámetro relación a/c no representa con suficiente precisión la permeabilidad objetivo, en particular cuando se involucran costos y gestiones comerciales.

No ocurre lo mismo con otras propiedades del concreto, como por ejemplo la resistencia a la compresión donde existe evidencia estadística que permite inferir que si existe una relación directa entre la relación a/c del concreto y dicha resistencia [11].

Otro factor que lleva al constructor a confiar en la relación a/c como parámetro principal de permeabilidad del concreto tiene su origen en las especificaciones técnicas de los proyectos de edificación. En dichos documentos se suele especificar la resistencia y el tipo de cemento y, solo en los más recientes, se indica la relación a/c para cumplir con lo dispuesto en las tablas de durabilidad del reglamento nacional de edificaciones [9], juzgándose esto suficiente para

garantizar una permeabilidad adecuada en el concreto frente a la presencia de humedad y sustancias agresivas en el medio en contacto con la estructura (principalmente sales y compuestos de sulfatos).

Usualmente estos requisitos se repiten sistemáticamente en los capítulos de materiales de los documentos de construcción, quedando esta restricción sin mayor sustento que cumplimiento normativo, lo que en el tiempo desarrolla la idea en el colectivo profesional de que esta caracterización es “suficiente” para la protección del concreto.

34

En el mundo y particularmente en el continente americano, se emplea una gran variedad de cementos que van desde los “clásicos” portland puros (del tipo I al tipo V), hasta los cementos adicionados y por desempeño, que consideran en su composición materiales que no pasan por el mismo proceso de transformación que experimenta el cemento en su fabricación; por el contrario suelen ser sub productos de otras industrias, tal como la microsílíce y escorias, y sin embargo aportan capacidad cementicia a la mezcla sin los efectos secundarios adversos que presenta el cemento ya transformado en concreto (contracción, vulnerabilidad química). Cabe destacar que también se puede adicional al cemento material fino que si bien no genera un aporte cementicio directo (materiales que no tienen actividad puzolánica significativa), si otorgan beneficios en cuanto a reducir vulnerabilidad, y mejoras en la reología. Tal es el caso de los cementos adicionados con caliza pulverizada (tipo ICo) e incluso cementos con CKD (Cement Kiln Dust).

En el Perú, a diferencia de sus vecinos regionales más cercanos, se encuentra muy difundido el uso de los cementos portland puros, normados por el organismo regulador de los estados unidos de Norteamérica, ASTM, de aceptación panamericana y seguido también por las normas peruanas [12], con algunos casos en provincias donde se trabajan con cementos adicionados, generalmente los tipos IPM, IP y ICo [13]. Recientemente las fábricas de cemento han lanzado al mercado cementos adicionados por desempeño, también normados por ASTM [14] sin embargo su adopción en el mercado local es aún lenta [15]. Es necesario precisar que cada cemento, dependiendo de su ubicación geográfica, es diferente según las fuentes de materias primas, a pesar de cumplir con los parámetros de su respectiva regulación, lo que a su vez se traslada al concreto que se produce en cada región.

La selección de cementos adicionados usualmente se basa en criterios de resistencia a la agresividad química [16], sin embargo, para el criterio de permeabilidad se aplica usualmente el mismo tratamiento para todos los tipos de cemento, es decir, definir una relación a/c, lo cual asume que la permeabilidad será la misma, independiente del tipo de cemento. Visto lo expresado en los párrafos anteriores, queda pendiente una explicación determinista sobre si esta presunción es correcta, requiriendo demostrar experimentalmente si se produce cambio en la permeabilidad manteniendo fijos los parámetros normados.

Siguiendo con el caso peruano, es importante destacar que otros países vecinos de la región han ido cambiando en los últimos años su enfoque respecto a la evaluación de la permeabilidad en el concreto, donde no solo se define la relación a/c, sino que se incorpora también las mediciones cuantitativas basadas en ensayos. Por ejemplo, en Colombia, existe ya una normativa nacional para determinar la permeabilidad del concreto en estado endurecido mediante la presión de agua [17], en tanto que en Chile la medición de

permeabilidad se incorpora directamente al reglamento nacional donde el requisito de permeabilidad es también medido según el método de presión de agua [18].

Resulta evidente, que la tradicional relación a/c , incluso especificando el tipo de cemento, presenta una serie de limitaciones sobre su efectividad práctica para fijar una permeabilidad real en el concreto sin que esta pueda ser variada por otros factores que no obstante cumplen con esta restricción. El ejemplo de países vecinos invita a evidenciar con datos técnicos la naturaleza real de la variación de permeabilidad dentro de las restricciones actualmente consideradas en el reglamento peruano, considerando los materiales localmente disponibles.

2. Análisis de la información de permeabilidad en la literatura técnica.

Como se ha señalado anteriormente, la permeabilidad es una característica que depende de los componentes del concreto y la combinación específica de estos, en donde la formación de la pasta cementicia tiene una especial relevancia [19]. Las investigaciones previas sobre la permeabilidad general del concreto, que se encuentran en la literatura técnica disponible, se pueden agrupar en cuatro campos principales:

Relaciones entre la permeabilidad y porosidad del concreto: Existe una relación entre la permeabilidad y la porosidad en la matriz de concreto endurecido del concreto [20]. Esta relación se ha probado experimentalmente con ensayos ultrasónicos a muestras de concreto, tomando como base la densidad del mortero "r" y un conjunto de canales equivalentes de diámetro "d". Al medirse la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto se observa que la atenuación de la velocidad es proporcional a la porosidad de la matriz de mortero, incrementándose a medida que aumenta el porcentaje de porosidad. Sin embargo, las pruebas experimentales muestran un cambio de pendiente conforme se alcanzan altas porosidades, lo que demuestra que la atenuación está siendo afectada no solo por la porosidad sino también por cambios en la microestructura del material.

En el mismo estudio, el análisis de la permeabilidad en gases sobre muestras saturadas, parcialmente saturadas y secas, muestran que la permeabilidad no solo depende de la porosidad, ya que también influye la conexión entre los capilares, distribución de tamaños de los poros, superficie específica y en general la microestructura de la pasta de mortero [21,22], concluyendo por tanto en la existencia de una relación lineal entre la velocidad de pulso ultrasónico, la porosidad y la permeabilidad [7].

El análisis de la microestructura de la pasta señala que cuando se incrementa el área de esta en la matriz de concreto, se incrementa también la permeabilidad. Sin embargo, existen estudios experimentales que sustentan el hecho de que la porosidad total no es una función directa de la permeabilidad, dado que el transporte de soluciones a través la matriz del concreto es afectada por factores adicionales, [23] como se indicó anteriormente.

La matriz de concreto no solo está compuesta de pasta. El agregado fino y grueso tienen también un papel importante en el condicionamiento de la microestructura pues su presencia restringe la cantidad de vacíos a llenar con la pasta cementicia. Este efecto del agregado en particular nos permite proyectar que mezclas con mayor o menor contenido de pasta disponible podrían formar microestructuras con estructuras capilares diferentes, siendo esto último determinante en las propiedades del concreto como permeabilidad y durabilidad [4]. Evidentemente al reducir la disponibilidad de pasta cementicia en el concreto, la red capilar a formarse también se reduce. Experimentalmente se observa que al reducir la relación a/c ,

se genera también la reducción de la capilaridad y consecuentemente la permeabilidad [24], siempre y cuando se reduzca también la cantidad de pasta en la mezcla. Si se reduce la relación a/c, pero se mantiene o incrementa la cantidad de pasta en la mezcla (aumentando por ejemplo la cantidad de agua y cemento para conservar trabajabilidad en casos donde no se usan aditivos) se tendrá mayor espacio disponible para la formación de poros capilares y consecuentemente mayor capilaridad y permeabilidad que una mezcla con mayor relación a/c y menor cantidad de pasta, contradiciendo la premisa inicial.

Efecto del agregado en la permeabilidad del concreto: La porosidad de la pasta es generalmente mayor que la porosidad en los agregados empleados en el concreto, por lo tanto, en la medida que se incrementa la cantidad de agregado la permeabilidad en el mortero se reduce. Así mismo, si las partículas de agregado ingresan a la mezcla relativamente secas, en los casos donde el porcentaje de absorción de agua no haya sido compensado en el diseño de concreto, la absorción dichas partículas contribuye a bajar la cantidad de agua en la pasta lo que también reduce permeabilidad [25]. Es necesario precisar sin embargo que esto último puede generar problemas en estado fresco (pérdida de trabajabilidad pronunciada y dificultada para la colocación).

El impacto del agregado en la permeabilidad del concreto está también influenciado por el potencial de percolación de la zona de interfase entre la pasta y el agregado. En la medida que esta zona de interfase tenga mayor o menor espesor, se afectará la propiedad de permeabilidad del conjunto [26].

Sin embargo, se observa que la mineralogía particular y el origen geológico de los agregados no impactan significativamente la permeabilidad del concreto (en términos simples la procedencia del material). Así mismo, las partículas de agregado grueso del concreto no contribuyen significativamente a la permeabilidad del conjunto dado que los poros del agregado no se conectan con los capilares/poros de la pasta, al ser la zona de interfase pasta-agregado una interrupción de conectividad capilar [27,28,29]. La distribución de tamaños por tanto constituye el factor clave, dado que las granulometrías con menor variabilidad de tamaños presentan una permeabilidad mayor que aquellas una mayor distribución de tamaños de partículas, que por tanto llenan de forma más eficiente los vacíos y consecuentemente requirieren de menor cantidad de pasta.

La razón de ello consiste en el hecho que los agregados con partículas de mayor tamaño requirieren una mayor cantidad de pasta para llenar los vacíos, generando una matriz que promueve la interconexión de poros y una mayor longitud de estos (capilaridad), en tanto que la presencia de partículas de menor tamaño permite un mejor acomodo y menor demanda de pasta [30].

Influencia de la microestructura en la permeabilidad del concreto: Al compararse la cuantificación de poros capilares por análisis tomográfico en rayos X (representación en tres dimensiones de la estructura capilar) vs. la permeabilidad al paso de cloruros para muestras de concreto (ensayo de permeabilidad rápida por cloruros normado por la norma ASTM C 1202) se observa que el parámetro físico detectado, "distancia entre poros desconectados", se relaciona con los resultados del ensayo de permeabilidad rápida por cloruros de manera inversa. Es decir que a mayor distancia entre poros desconectados (capilaridad interrumpida) menor resulta la permeabilidad medida por el ensayo de penetración rápida por cloruros [31].

Esta correlación entre los poros desconectados y las lecturas del ensayo de permeabilidad son consistentes con el hecho ¹⁹ de al comparar dos variantes con igual volumen de concreto, la variante cuya pasta tenga mayor contenido de agua, obtendrá consecuentemente el mayor volumen total de espacio disponible, por lo que luego de la hidratación este mayor espacio termina formando un mayor conjunto de vacíos traducido en poros y redes capilares [32].

Lo inverso por tanto también se cumple, al reducirse el agua para la misma cantidad de material cementicio, se obtendrá una pasta más densa y menor red capilar lo cual evidentemente reducirá la permeabilidad del conjunto [33].

Una microestructura más porosa, con mayor cantidad de vacíos e interconexión entre ellos, conformará en consecuencia una matriz más débil a comparación de las pastas más densas y consolidadas. En ensayos de mezclas de concreto con diferentes relaciones a/c y con diferentes adiciones cementicias, se observa que la permeabilidad medida con el método ASTM C 1202, resulta menor, a medida que la resistencia se incrementa [34].

Dado que el mecanismo de construcción de la microestructura es principalmente la hidratación del cemento (y si las hubiere, adiciones reactivas) es importante resaltar lo que ocurre con la absorción de agua. Al permitir el concreto una mayor absorción superficial, se promueve el incremento de la densidad de la masa, dado por un mayor crecimiento y entramado de los minerales, productos de la reacción del cemento y las adiciones con el agua y por tanto la consecuentemente la disminución de la capilaridad. ⁵³ experimentalmente se ha encontrado que existe correlación lineal entre la capacidad de absorción de agua por la superficie de concreto y la permeabilidad de este [35]. Es por ello por lo que el tiempo que el concreto permanezca en un estado de hidratación activa (contacto con el agua) necesariamente modificará los valores de permeabilidad final de este.

¹⁰

Durabilidad y vida en ²⁹ servicio de las estructuras de concreto armado: Cuando se consideran los comportamientos a largo plazo de las estructuras de concreto armado, entra en relevancia el concepto de durabilidad, que representa en su sentido más amplio el tiempo durante el cual el material trabajará conforme a los parámetros de diseño en las condiciones de servicio especificadas, dado que eventualmente, al final de su vida útil, fallará.

El deterioro del concreto, salvo eventos accidentales no previstos, se dará en función al acceso que las sustancias en solución que degraden el cemento o los agregados tengan al interior de la masa de concreto. Incluso si una sustancia no es químicamente perjudicial, su comportamiento físico ²² puede ser nocivo de penetrar en la masa de concreto [36].

Patologías como la carbonatación y el desgaste por ciclos de hielo y deshielo, son dependientes específicamente de la permeabilidad superficial (que como hemos visto, tiene relación directa con la permeabilidad total del concreto y viene condicionada en parte por los procesos de curado), dado que en un caso la sustancia agresiva, gas de CO₂, generará un nivel de daño equivalente a la profundidad de penetración en la superficie de concreto. Así mismo, en el caso del hielo y deshielo, el daño depende también de la profundidad que el agua pueda penetrar para luego congelarse y romper el concreto por expansión [37].

Lo mismo puede observarse en el campo de sustancias químicamente más agresivas (principalmente en estructuras en contacto con el suelo) como es el caso del ataque por sustancias con iones de sulfatos libres, donde la permeabilidad del concreto resulta clave para retrasar el deterioro. La resistencia del concreto a este tipo de agresividad química tiene por tanto dos aspectos, la parte física determinada por la capilaridad/permeabilidad de la matriz y la parte química dada por la composición específica del cementante empleado.

Experimentalmente se observa que la expansión que sufre ¹²concreto debido a la formación de compuestos químicos, producidos por la reacción ⁶entre los iones de sulfato y los componentes del cemento, disminuye a medida que se reduce la capacidad de ingreso de las soluciones acuosas al interior de la matriz de concreto, dado ⁶que se reduce la disponibilidad de fases químicas reaccionantes con los iones sulfatos [38].

Siendo que la gran mayoría de estructuras de concreto contienen algún tipo de armadura, es importante conectar lo anterior con el fenómeno de corrosión. Naturalmente el concreto provee un alto grado de protección al acero en su interior debido a que configura un ambiente alcalino, con ph usualmente superior a 12. Debe tenerse en cuenta sin embargo que la activación de la corrosión depende de la disponibilidad de los factores que se requieren para iniciar la reacción química: disponibilidad de oxígeno, humedad y disminución del ambiente alcalino circundante (que se produce al carbonatarse el concreto), por lo que nuevamente la permeabilidad y su reducción constituye un elemento clave en la prevención del daño por corrosión [1].

Existe por tanto base científica y estudios realizados por numerosos investigadores que otorgan importancia a la conformación de la microestructura de la pasta cementicia para definir la permeabilidad del concreto, que como se ha ¹⁸identificado no alcanza a ser descrita en su totalidad por el parámetro relación a/c. Siendo ¹⁸que la permeabilidad es la propiedad clave en la durabilidad de las estructuras de concreto armado [3], la demostración experimental debe dejar en claro, usando diferentes metodologías de ensayo, cual es la variación que tienen los criterios actuales normativos en el entorno peruano, así como una propuesta de mejora de la evaluación de dicha propiedad, preferentemente con la determinación de parámetros prácticos aplicables a la realidad de obra y producción industrial de concreto.

3. Metodología

Considerando la información técnica revisada ²⁰ante, se opta para la investigación experimental tomar como elemento de control la ²⁰microestructura de la pasta cementicia, representada por ²⁰la relación pasta (cemento más agua) entre el agregado (suma de arena y piedra) e identificada por P/A. Con el fin de simplificar las demostraciones, reduciendo al máximo la variables a controlar, se opta por trabajar sin el uso de adiciones cementicias con diseños de concreto con solo cemento como material amalgamante.

Siendo el caso de estudio para materiales peruanos, se desarrollan las mezclas de concreto para los ensayos utilizando los principales cementos usados en la capital del país. Si bien existe una mayor variedad de cementos a nivel nacional, se tomarán solo tres alternativas locales, para evitar incrementar la complejidad de la experimentación, y cumplir con los objetivos del análisis.

Los agregados a emplear en la evaluación son de origen local dentro de la ciudad de Lima, lo mismo que la fuente de agua, suministrada de la red pública de saneamiento. Se considera el uso de aditivos plastificantes y retardantes, dado que los diseños de mezclas experimentales son representativos del mercado local de construcción industrial con concreto premezclado. Ello permitirá que los resultados a obtener no se encasillen en el ámbito de laboratorio y tengan aplicación directa a la realidad de obra.

Para la demostración experimental se utilizará el enfoque de variación secuencial del parámetro relación P/A, cambiando la cantidad de cemento y agua, considerando por m³ 500 kg, 450 kg, 400 kg y 350 kg. Esta variación se repite para cada tipo de cemento a utilizar: cemento portland tipo I, cemento puzolánico tipo IP y cemento categoría HS. Finalmente, las dos capas anteriores se ejecutarán en dos escenarios de restricción de la relación a/c: 0.50 y 0.45.

Las 24 mezclas de prueba por realizarse, 4 variantes de relación P/A por los 3 tipos de cemento para las dos relaciones a/c, permitirán determinar los patrones de comportamiento comunes a las variables indicadas y por tanto obtener conclusiones de alcance general. Las variantes experimentales se describen en la tabla 1.

Se emplea dos metodologías de ensayo para medir la permeabilidad del concreto: el método europeo por presión hidráulica [39], usado localmente por algunas especificaciones y empresas extranjeras, y el método por transferencia electrolítica, conocido también como “permeabilidad rápida por cloruros” [40], también usado con frecuencia en las especificaciones de construcción de infraestructura local.

Tabla 1

Variantes de prueba a evaluar			
Tipo de cemento	Valor de relación a/c	Composición de la pasta	Identificación
Portland tipo I	0.50	500 kg/m ³ cemento & 250 kg/m ³ agua	1SC280N67B-001
	0.50	450 kg/m ³ cemento & 225 kg/m ³ agua	1SC280N67B-002
	0.50	400 kg/m ³ cemento & 200 kg/m ³ agua	1SC280N67B-003
	0.50	350 kg/m ³ cemento & 175 kg/m ³ agua	1SC280N67B-004
	0.45	500 kg/m ³ cemento & 225 kg/m ³ agua	1SC315N67B-005
	0.45	450 kg/m ³ cemento & 202.5 kg/m ³ agua	1SC315N67B-006
	0.45	400 kg/m ³ cemento & 180 kg/m ³ agua	1SC315N67B-007
	0.45	350 kg/m ³ cemento & 157.5 kg/m ³ agua	1SC315N67B-008
Puzolánico tipo IP	0.50	500 kg/m ³ cemento & 250 kg/m ³ agua	1PSC280N67B-009
	0.50	450 kg/m ³ cemento & 225 kg/m ³ agua	1PSC280N67B-010
	0.50	400 kg/m ³ cemento & 200 kg/m ³ agua	1PSC280N67B-011
	0.50	350 kg/m ³ cemento & 175 kg/m ³ agua	1PSC280N67B-012
	0.45	500 kg/m ³ cemento & 225 kg/m ³ agua	1PSC315N67B-013
	0.45	450 kg/m ³ cemento & 202.5 kg/m ³ agua	1PSC315N67B-014
	0.45	400 kg/m ³ cemento & 180 kg/m ³ agua	1PSC315N67B-015
	0.45	350 kg/m ³ cemento & 157.5 kg/m ³ agua	1PSC315N67B-016
Categoría HS	0.50	500 kg/m ³ cemento & 250 kg/m ³ agua	1HSSC280N67B-017
	0.50	450 kg/m ³ cemento & 225 kg/m ³ agua	1HSSC280N67B-018
	0.50	400 kg/m ³ cemento & 200 kg/m ³ agua	1HSSC280N67B-019
	0.50	350 kg/m ³ cemento & 175 kg/m ³ agua	1HSSC280N67B-020
	0.45	500 kg/m ³ cemento & 225 kg/m ³ agua	1HSSC280N67B-021
	0.45	450 kg/m ³ cemento & 202.5 kg/m ³ agua	1HSSC280N67B-022
	0.45	400 kg/m ³ cemento & 180 kg/m ³ agua	1HSSC280N67B-023
	0.45	350 kg/m ³ cemento & 157.5 kg/m ³ agua	1HSSC280N67B-024

3.1 Materiales

Los parámetros del diseño de base (tabla 1) se obtendrán con el uso de aditivos plastificante (Master Rheobuild 1202) y retardante (Master Rheobuild 2110), con el objetivo de obtener los mismos valores de asentamiento en el concreto fresco a pesar del cambio en las cantidades de cemento, tipo de este y de agua.

Tabla 2

Parámetros de diseño experimental

Asentamiento inicial (ASTM C 143)	18 cm a 23 cm
Mantenimiento de la trabajabilidad	Pérdida de asentamiento de 4 cm/hora
Porcentaje de arena	53%
Porcentaje de piedra	47%
Peso unitario	2200 kg/m ³ a 2400 kg/m ³
Volumen de prueba	0.160 m ³

Para las dos relaciones a/c a evaluar, se cambiará la relación P/A variando la cantidad de cemento y agua (tabla 2) en la mezcla de concreto.

Tabla 3

Combinaciones de cemento y agua por relación a/c – dosificación en kg por m³

Relación a/c = 0.50		Relación a/c = 0.45	
Cemento	Agua	Cemento	Agua
500	250	500	225
450	225	450	202.5
400	200	400	180
350	175	350	157.5

En función a los valores anteriores, se obtiene el cociente P/A considerando para cada variante el peso de la suma de los agregados en el denominador. Debe tenerse presente que la cantidad de agua corresponde al valor de diseño en condición seca de agregados (condición estándar de laboratorio).

La selección de cementos a evaluar, tres por cada batería de combinación, representan tres clases: el cemento portland tipo I, el cemento puzolánico IP y el cemento categoría HS, siendo estos los cementos de mayor uso en la capital nacional. Tal como ilustra la figura 1, se tiene un representante por cada normativa y tecnología de cemento: “la clásica” normado por ASTM C 150 (a), los adicionados normados por ASTM C 595 (b) y los cementos por desempeño normados por ASTM C 1157 (c) (tabla 3).



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Marcas comerciales de cementos empleados: (a) cemento SOL tipo I, (b) cemento Atlas puzolánico tipo IP, (c) cemento Andino Ultra categoría HS.

Tabla 4

Características de los cementos			
Marca	Cemento Sol tipo I	Cemento Atlas IP	Cemento Andino Ultra HS/MH/R
Normativa	ASTM C 150 NTP 334.009	ASTM C 595 NTP 334.090	ASTM C 1157 NTP 334.082
Fineza Blaine	335 m²/kg	498 m²/kg	489 m²/kg
Resistencia a compresión (cubos a 28 días)	43.1 MPa	35.9 MPa	40.1 MPa
Adición	--	Puzolana	Puzolana + escorias*

(*) Las escorias son originadas en altos hornos siderúrgicos, reconocidas en el reglamento nacional de edificaciones y conforme al estándar ASTM C 989.

El agua empleada para la producción de los concretos se obtuvo de la red industrial potable, en tanto que los agregados fino y grueso se obtuvieron de la cantera Jicamarca, ubicada en el distrito de San Juan de Lurigancho a 25 km al este del centro de Lima.

Estos últimos cumplen con lo dispuesto en el estándar ASTM C 33 relativo a los requisitos de áridos para concreto, como muestran la Fig. 2, así como el resto de los parámetros físicos.

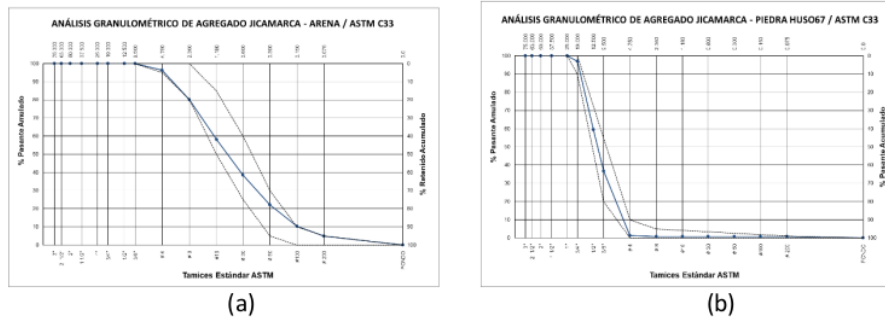


Fig. 2 (a) curva granulométrica de la arena, (b) curva granulométrica de la piedra triturada.

3.2 Equipos e instrumental

Para la obtención de los resultados experimentales se ejecutan tres ensayos tal como se ilustra en la Fig 3. El primero de estos corresponde al ensayo de compresión uniaxial (a), para lo cual se empleó una prensa uniaxial de 1195 KN de capacidad nominal, acción automática, con aplicación de carga constante a una tasa de 0.25 MPa/s con tolerancia de ± 0.05 MPa/s. Los ensayos se realizaron acorde al estándar ASTM C 39, expresándose la resistencia en MPa. El ensayo de permeabilidad por presión de agua (b) se ejecutó con una máquina de tres puestos que somete los testigos a una presión constante de agua de 500 ± 50 KPa durante un plazo de 72 ± 2 horas. Los ensayos se realizaron acorde al estándar europeo UNE EN 12390-8, reportándose los valores de permeabilidad en mm de penetración del agua.

El tercer ensayo ejecutado es la medición de permeabilidad por resistividad eléctrica (c) empleando una batería de celdas electrolíticas y un cabezal electrónico para el registro de las señales. Estos ensayos se realizaron conforme al estándar ASTM C 1202, reportando los valores en unidades de carga eléctrica, coulombs.

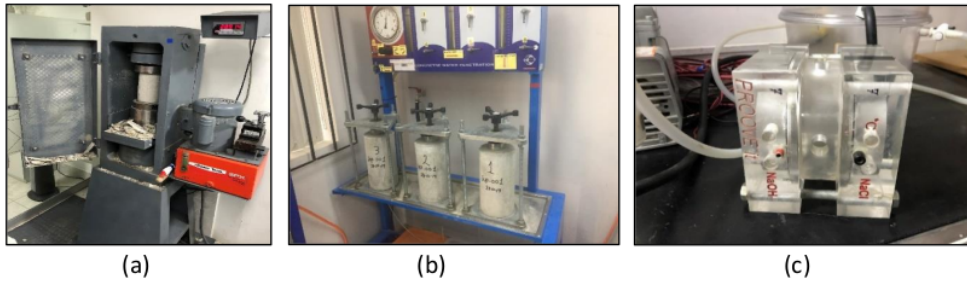


Fig. 3 (a) Prensa uniaxial para ensayos a compresión, (b) dispositivo de ensayo bajo presión de agua, (c) celda electrolítica para ensayo de resistividad eléctrica.

4. Ensayos

Se toma para cada una de las 24 variantes experimentales, 4 testigos cilíndricos de 15.2 cm de diámetro y 30.5 cm de altura y 12 testigos de 10.2 cm de diámetro y 20.3 cm de altura para la ejecución de los ensayos señalados anteriormente tanto a 28 como a 365 días.

Los testigos cilíndricos (probetas) obtenidos de las mezclas de prueba se someten a curado estándar, conforme a lo prescrito en ASTM C 511. El curado tiene como objetivo hidratar el concreto en dos plazos específicos: A 28 días por ser la edad típica de medición de resistencia del concreto en el mercado industrial, y a 365 días para lograr el máximo potencial de hidratación del cemento, con el objetivo de registrar el impacto de la hidratación en los resultados de permeabilidad.

Una vez cumplido el plazo de curado respectivo, las muestras se extraen de la poza y se colocan en un contenedor de plástico cerrado (no hermético) para su secado hasta el turno de ensayo.

Los valores experimentales, se recopilan conforme se van ejecutando los ensayos, para su posterior procesamiento.

5. Resultados

Los resultados de los ensayos experimentales, obtenidos en cada una de las 24 variantes según el tipo de cemento, relación a/c, relación P/A y estado de hidratación, se comparan teniendo como base la relación P/A, que va cambiando al mantener el resto de los parámetros fijos. El objetivo de la comparación es evidenciar las tendencias que exhiben los resultados en cada propiedad e identificar las diferencias de comportamiento entre los diferentes materiales y condiciones empleadas.

En base a estos hallazgos puede corroborarse o refutarse las premisas iniciales en cuanto a la permeabilidad del concreto.

5.1 Resistencia a la compresión uniaxial.

Al ordenar los resultados de resistencia a compresión uniaxial de las variantes en términos de resistencia vs. variación de la relación P/A, resulta evidente que la resistencia no solo no es constante (a pesar de estar fija la relación a/c), sino que esta varía significativamente dependiendo del tipo de cemento empleado, exhibiendo comportamientos diferentes e

incluso contrarios, tal como ilustra la Fig. 4. Fijando la relación $a/c = 0.50$, para los concretos puzolánicos a mayor cantidad de agua la resistencia sube, en tanto que para el cemento categoría HS, la resistencia disminuye.

Estas tendencias se atenúan al realizar el mismo análisis a un mayor potencial de hidratación, sin embargo, las variantes con cemento tipo I difieren de los dos cementos anteriores, con un comportamiento aleatorio tanto a 28 días de hidratación como a 365.

El comportamiento descrito anteriormente vuelve a cambiar, con tendencias diferentes, al pasar a la relación $a/c = 0.45$, donde las curvas experimentales se muestran paralelas a 28 días de hidratación y con un comportamiento similar, excepto por las variantes con cemento categoría HS, al comparar los resultados a 365 días de hidratación.

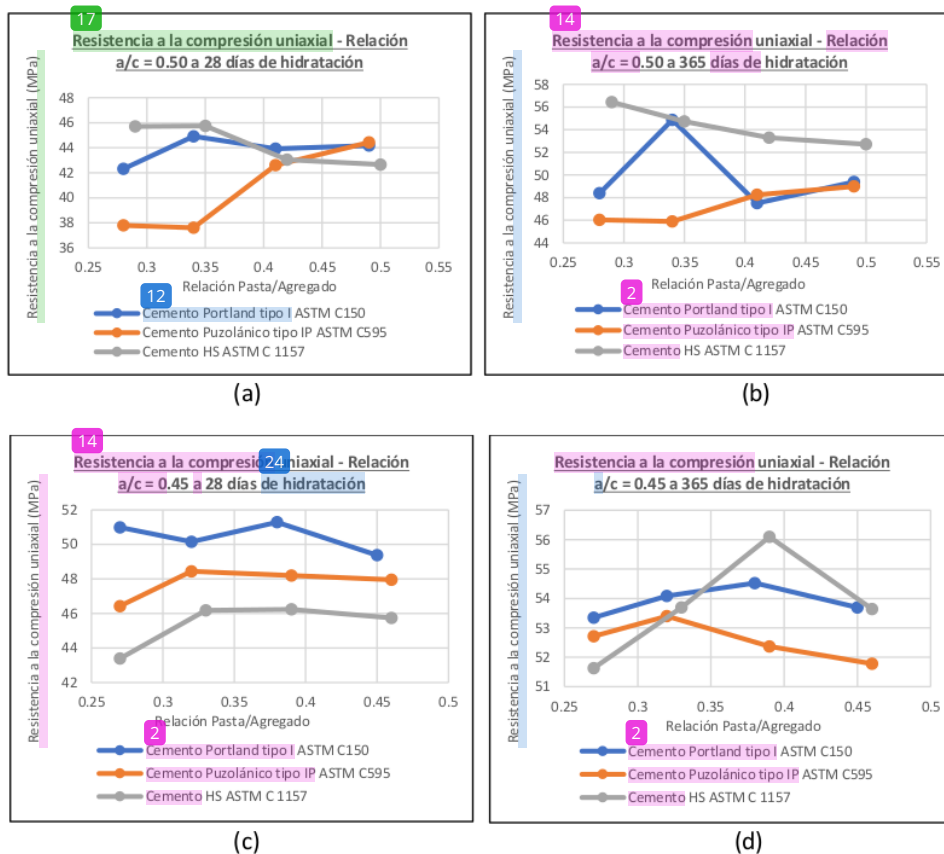


Fig. 4 (a) comparativo a 28 días de hidratación con relación $a/c = 0.50$, (b) comparativo a 365 días de hidratación con relación $a/c = 0.50$, (c) comparativo a 28 días de hidratación con relación $a/c = 0.45$, (d) comparativo a 365 días de hidratación con relación $a/c = 0.45$.

El análisis de los resultados indica claramente que dentro de una relación a/c fija, la resistencia varía conforme aumenta la cantidad de cemento y agua en la mezcla de concreto, y que la magnitud de dicha variación está en función al tipo de cemento y condición de hidratación.

Se comprueba además que en todos los casos existe un desarrollo posterior de resistencia pasados los 28 días de hidratación, donde el cemento categoría HS tiene el mayor porcentaje de crecimiento relativo respecto a los otros cementos, siendo esto consistente con el hecho de que se trata del cemento con mayor cantidad de adición cementicia y por tanto desde el punto de vista químico con mayor potencial de desarrollo de productos de hidratación en el largo plazo.

Cabe señalar que la variación de la resistencia obtenida tanto a 28 como a 365 días para ambas condiciones de relación agua/cemento (a/c), muestra variaciones en función al tipo de cemento. Como se observa en las siguientes gráficas, el crecimiento residual de resistencia de 28 a 365 días es significativamente diferente al contrastar las relaciones agua/cemento 0.50 con la 0.45, siendo menor esta última.

Considerando por tipo de cemento y relación agua/cemento, con el rango de resistencias obtenidas variando la relación Pasta/Agregado (P/A) se calcula el diferencial del rango y se divide entre el promedio que cuantificando la variabilidad (en porcentaje) que tiene la resistencia en cada relación a/c por tipo de cemento.

Como se observa en la figura 5 para la relación a/c = 0.50, la mayor variación dentro del rango a 28 días se presenta en el cemento puzolánico tipo IP, sin embargo, esto cambia al progresar la hidratación a 365 días, donde la mayor variación se presenta en el cemento tipo I. Por contraste en este caso, el cemento HS tiene la misma variación de 28 a 365 días.

Una situación diferente se presenta para el caso de la relación a/c = 0.45, donde las variaciones de resistencia dentro del rango de cambio del parámetro P/A, es significativamente menor. En este escenario la mayor variación entre los tres se presenta en el cemento categoría HS.

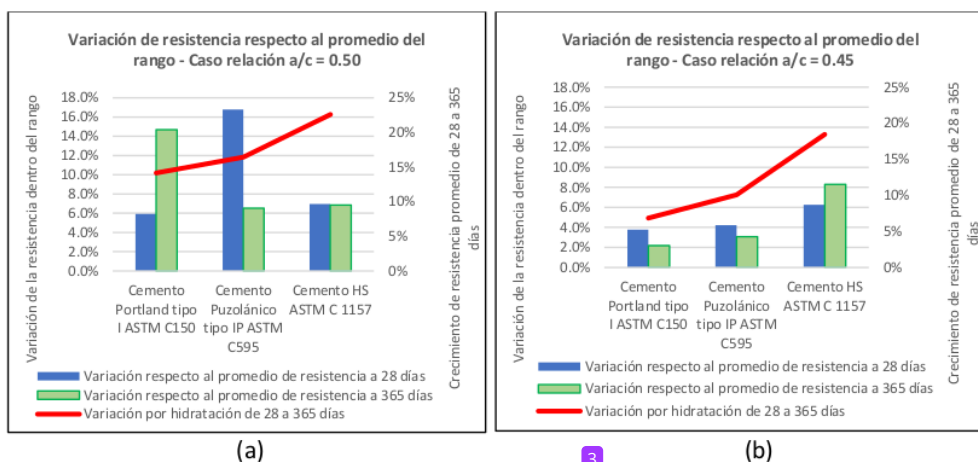


Fig. 5 (a) Variación de resistencia en el rango cambio P/A para relación a/c = 0.50 según tipo de cemento, (b) Variación en el rango de cambio P/A para la relación a/c = 0.45 según el tipo de cemento. La línea roja marca la variación del promedio del rango de 28 a 365 días.

Podemos destacar luego que si bien la variación de resistencia conforme se aumenta o disminuye la cantidad de pasta en el concreto no es tan importante como los cambios en permeabilidad, se puede percibir que esta variación va disminuyendo conforme baja la

relación agua/cemento. Así mismo podemos ir descartando que esta variación a través de las relaciones a/c se mantenga constante para cada cemento utilizado.

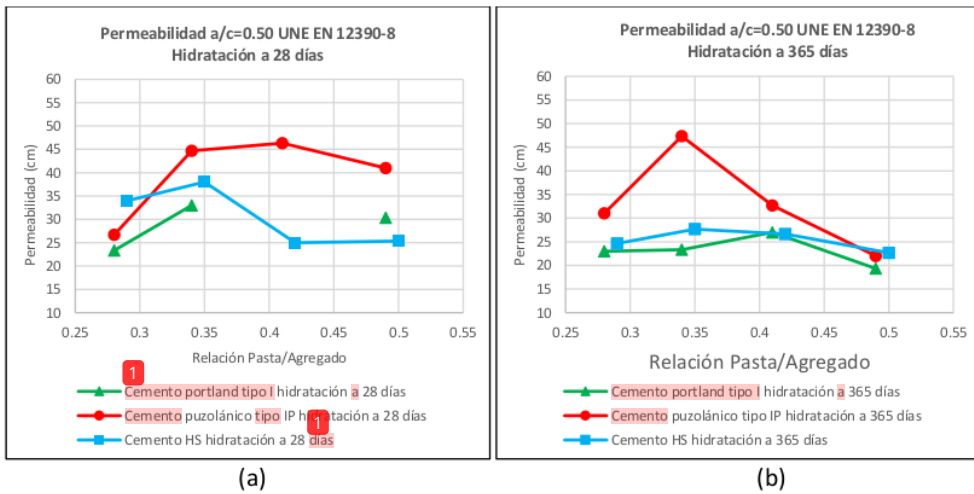
5.2 Medición de permeabilidad con el método UNE.

Similar a lo realizado con los ensayos de resistencia a la compresión, se hace un arreglo de los datos experimentales usando como base de variación la relación P/A, comparando las tendencias de los valores en los tres tipos de cemento a los dos plazos de hidratación, a 28 y 365 días.

La figura 6 presenta los 4 casos experimentales evaluados, en la primera imagen para relación a/c = 0.50 e hidratación de 28 días (a) se muestra un comportamiento significativamente aleatorio en los resultados experimentales, donde las tendencias son contradictorias con lo presentado en el caso de hidratación a 365 días, en donde incluso la permeabilidad disminuye al incrementarse la relación P/A (b) para los tres tipos de cemento, contradiciendo lo esperado por la teoría e investigaciones anteriores.

En los casos con relación a/c = 0.45, se observa que los valores de permeabilidad presentan una mayor consistencia reflejado en las tendencias para los tres tipos de cemento conforme se incrementa la relación P/A. En la imagen se observa que conforme se incrementa la cantidad de pasta, la permeabilidad aumenta (c). Los mismo se presenta en la última imagen, caso de hidratación a 365 días, donde incluso las tendencias son más cercanas y definidas.

Los 4 gráficos obtenidos a partir de los resultados de ensayos experimentales permiten distinguir dos comportamientos diferentes, si bien en ambos casos es el mismo ensayo: En el caso de la relación agua/cemento 0.50 las tendencias obtenidas permeabilidad vs. cantidad de pasta (expresada en la relación P/A) no guardan consistencia con otras investigaciones relativas a la permeabilidad del concreto e incluso se contradicen dentro de la misma gráfica (la permeabilidad sube para luego disminuir, conforme se va incrementando la relación P/A), en tanto que para el caso de relación agua/cemento 0.45 si se observa la coherencia con la teoría y otros ensayos para permeabilidad en el concreto.



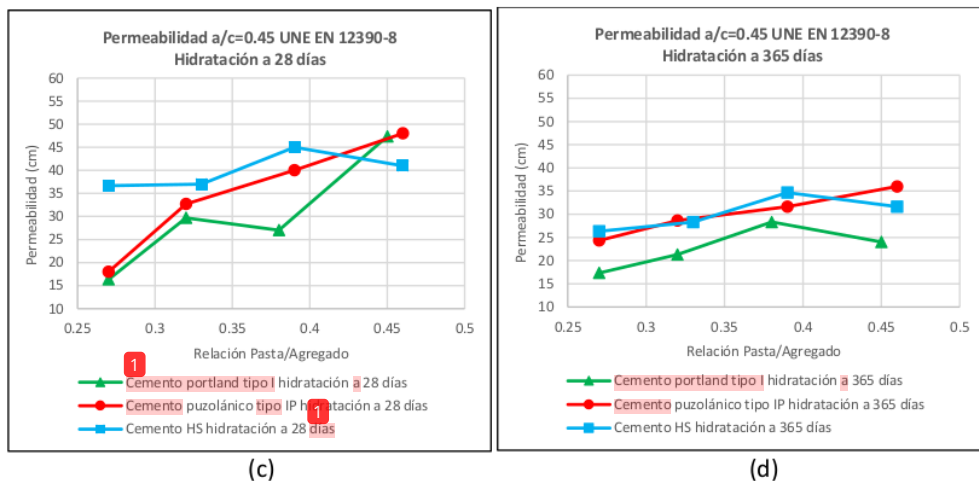


Fig. 6 (a) Comparativo de las mediciones de permeabilidad para las tres alternativas de cemento según la progresión de relación P/A, para el caso relación a/c = 0.50 y tiempo de hidratación 28 días, (b) Comparativo para el caso relación a/c = 0.50 y tiempo de hidratación 365 días, (c) Comparativo para el caso relación a/c = 0.45 y tiempo de hidratación 28 días, (d) Comparativo para el caso relación a/c = 0.45 y tiempo de hidratación 365 días.

A pesar de lo anterior, puede extraerse de los valores obtenidos, la evidencia del cambio en la permeabilidad manteniendo la relación a/c, en función a la variación de la relación P/A.

Queda sin embargo el problema de la inconsistencia de los resultados en el caso de la relación a/c = 0.50, donde incluso en el mismo concreto las tendencias cambian al tenerse una mayor hidratación. Esto significaría que el propio método de ensayo que produce los valores experimentales, tiene dificultad para representar con suficiente precisión la permeabilidad del concreto. A lo anterior se suma lo observado al reducir la relación a/c donde los resultados presentan menor dispersión y las tendencias coinciden entre los tres tipos de cementos, con mayor consistencia con lo esperado por la teoría y referencias científicas. Todo esto sugiere que este método de ensayo pierde precisión a relaciones a/c elevadas. Se requerirá una mayor base experimental, específica para determinar la precisión, para confirmar lo anterior.

Considerando solo los resultados para relación a/c = 0.4, se puede advertir que la permeabilidad baja para todos los tipos de cemento al incrementarse el tiempo de hidratación de la pasta, lo cual es consistente con el fenómeno físico químico del proceso de hidratación del cemento y del bloqueo progresivo de los conductos capilares en la pasta por la formación de los productos de hidratación en forma de microcristales minerales.

Dada la aleatoriedad de los datos descrita anteriormente no pueden extraerse mayores comparaciones del comportamiento por tipo de cemento.

5.3 Medición de permeabilidad con el método ASTM

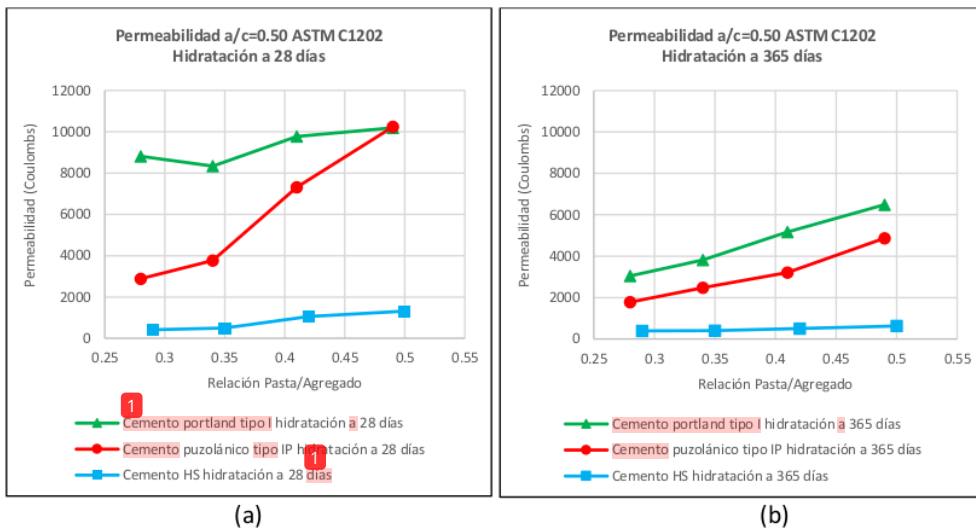
Considerando las mismas variables experimentales, se repiten las evaluaciones de permeabilidad, cambiando el método de ensayo al descrito por ASTM C 1202, medición por cloruros. Los resultados se comparan nuevamente en función al incremento de la relación

P/A, para los tres tipos de cemento para los casos de relación a/c 0.45 y 0.50 así como sus respectivos plazos de hidratación a 28 y 365 días.

Los valores experimentales obtenidos se presentan en la figura 7, donde en todas las variantes se presenta una pendiente positiva de incremento de la permeabilidad respecto al incremento de la relación P/A, cambiando el valor de la pendiente en función al tipo de cemento.

En la primera imagen, caso de relación a/c = 0.50, (a) se observa que la menor permeabilidad es obtenida por la variante con cemento categoría HS con muy poco cambio conforme se incrementa la cantidad de pasta. Es notable también la variación significativa en términos de permeabilidad (recordemos para una misma relación agua/cemento) que experimenta la variante con cemento puzolánico, que refleja la química particular de su pasta y capacidad de reducción y/o bloqueo de capilares mediante los procesos de hidratación posterior a la inicial. Lo anterior, es corroborado por la segunda imagen (b) sobre el mismo caso, pero con hidratación a 365 días donde se ve, además de la atenuación de las dispersiones, la misma distribución de los resultados (con la misma reducción de permeabilidad por mayor hidratación, tal como se observó con el método de ensayo UNE).

La tercera (c) imagen presenta el cambio de relación agua/cemento a 0.45, donde se observa el mismo comportamiento que en los casos anteriores, aunque las diferencias entre los tipos de cementos son menores a los 28 días de hidratación y también, como se evidencia en la última imagen (d), a los 365 días de hidratación del concreto.



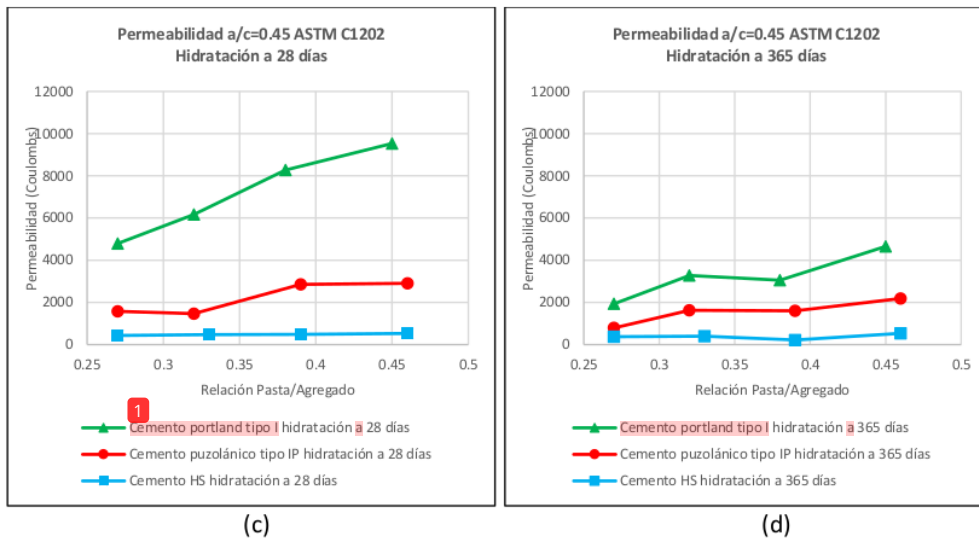


Fig. 7 Comparativo de las mediciones de permeabilidad para las tres alternativas de cemento según la progresión de relación P/A: (a) para el caso relación a/c = 0.50 y tiempo de hidratación 28 días, (b) para el caso relación a/c = 0.50 y tiempo de hidratación 365 días, (c) para el caso relación a/c = 0.45 y tiempo de hidratación 28 días y (d) para el caso relación a/c = 0.45 y tiempo de hidratación 365 días.

A diferencia del método UNE, en el caso del ensayo por resistividad eléctrica se observa una mayor consistencia en los datos experimentales, en las cuatro variantes se ven las mismas tendencias, en los que se identifican claramente las tendencias por el tipo de cemento usado. Se observa que los valores de permeabilidad son menores a mayor plazo de hidratación, conservando consistencia con los estudios experimentales previos de densificación de la pasta por hidratación. Se conservan también dichas tendencias al pasar de relación a/c 0.50 a 0.45, sin embargo, para la menor relación las pendientes incrementales de permeabilidad reducen.

En el caso del grupo con cemento tipo I, si bien para altas relaciones P/A la permeabilidad sigue siendo alta, al pasar a la relación a/c = 0.45, la pendiente incremental de permeabilidad es significativamente mayor, reduciéndose apreciablemente el valor registrado para baja relación P/A.

5.4 Comparación entre métodos de medición de permeabilidad

Un aspecto importante por resolver consiste en determinar la precisión y confiabilidad relativa de los métodos de medición de la permeabilidad. Si bien la estructuración de los ensayos y parámetros experimentales no permite establecer numéricamente la variación e incertidumbre de cada método, si se puede realizar una evaluación cualitativa basados en la dispersión y tendencia de los resultados.

La figura 7 ilustra claramente lo sucedido al comparar los resultados obtenidos por los métodos ASTM y UNE, donde se aprecia para el caso de la relación a/c = 0.50 una clara diferencia en la consistencia de los resultados experimentales y sus tendencias. Para la misma muestra de concreto, en los resultados UNE **la permeabilidad disminuye** mientras **se incrementa la relación P/A** en tanto **que** los resultados ASTM indican lo contrario (a), situación que se mantiene al pasar a un mayor plazo de hidratación (b).

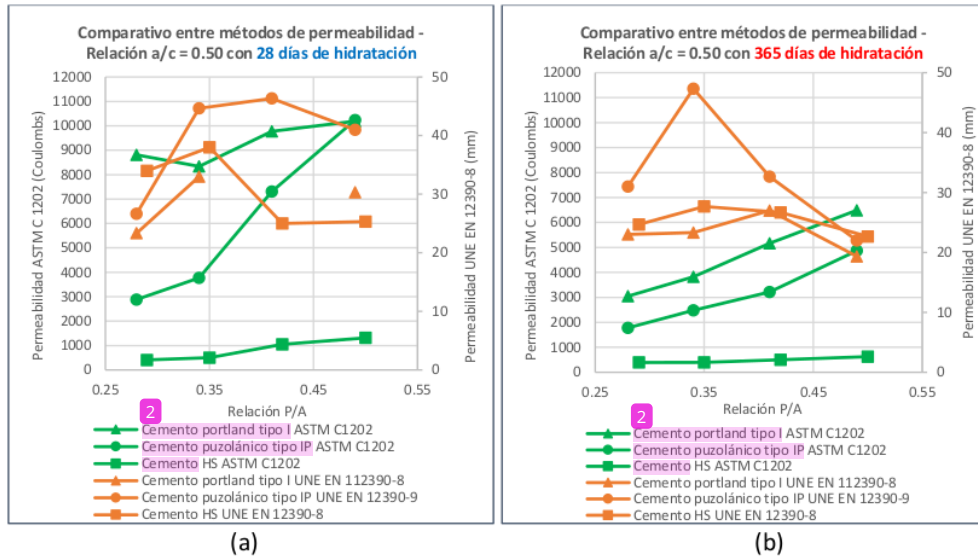


Fig. 7 (a) Contraste de métodos con a/c = 0.50 e hidratación a 28 días, (b) Contraste de métodos con a/c = 0.50 e hidratación a 365 días.

Sin embargo, estas discrepancias entre métodos se reducen significativamente al pasar a una menor relación a/c, tal como se observa en la figura 8, donde las tendencias UNE se muestran en la misma tendencia positiva incremental que sus contrapartes ASTM, claro está que tomando los valores como tendencia general del grupo por tipo de cemento.

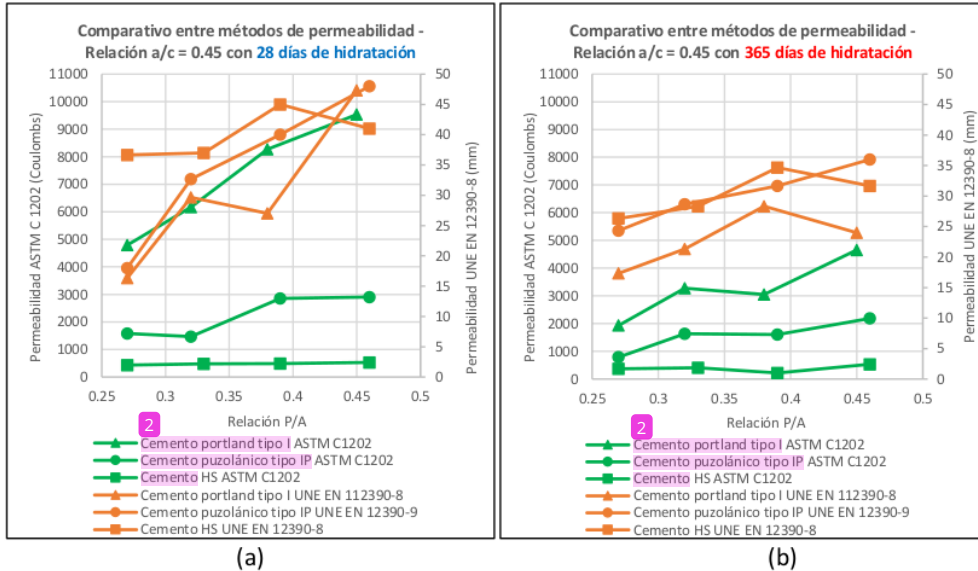


Fig. 8 (a) Contraste de métodos con a/c = 0.45 e hidratación a 28 días, (b) Contraste de métodos con a/c = 0.45 e hidratación a 365 días.

La comparación de resultados entre ambos métodos de medición indica una mayor consistencia en ambos casos de relación a/c para las mediciones realizadas con el método ASTM. Si bien es cierto que en el caso de la relación a/c = 0.45 el método UNE logra estabilizarse y obtener tendencias lineales positivas frente al incremento de la relación P/A, aún se presentan resultados atípicos respecto a lo esperado para una microestructura con mayor cantidad de pasta.

La mayor hidratación de la microestructura del concreto ayuda también a estabilizar la tendencia de permeabilidad en ambos métodos, sin embargo, para la a/c = 45, este efecto es menor que el caso anterior.

Desde el punto de vista de los propios valores experimentales, se puede apreciar una mayor dispersión entre los testigos ensayados por el método UNE EN 12390-8 respecto a lo obtenido con el método ASTM C 1202 para cada mezcla experimental, reflejándose en el peso porcentual que tiene la desviación estándar respecto al promedio del ensayo. Si bien en estricto el cálculo de la desviación estándar con dos o tres valores no estadísticamente preciso, al analizar para los 24 promedios en cada ensayo, permite establecer una comparación lo suficientemente clara para observar la diferencia entre los métodos, tal como se refleja en las figuras 9 y 10.

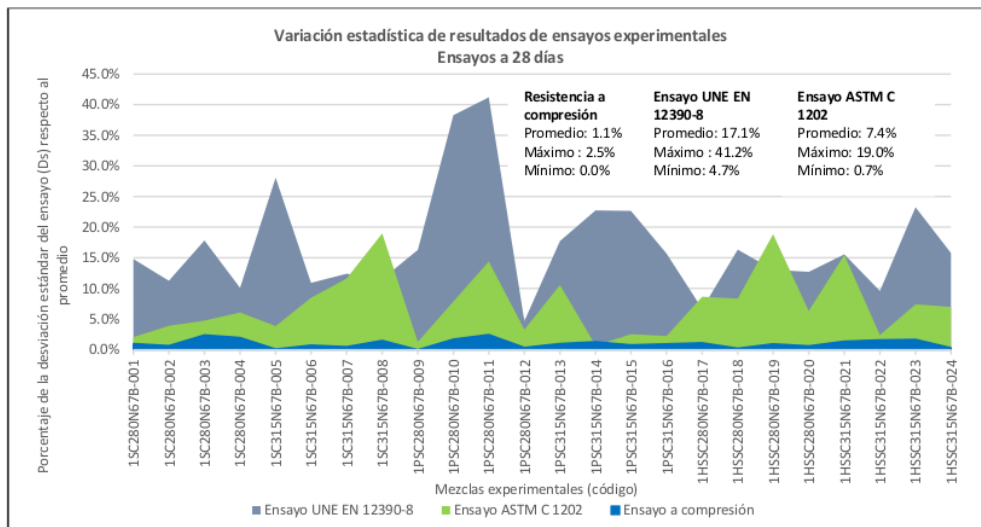


Fig. 9 Distribución comparativa de desviación entre testigos respecto al promedio del ensayo (edad 28 días).

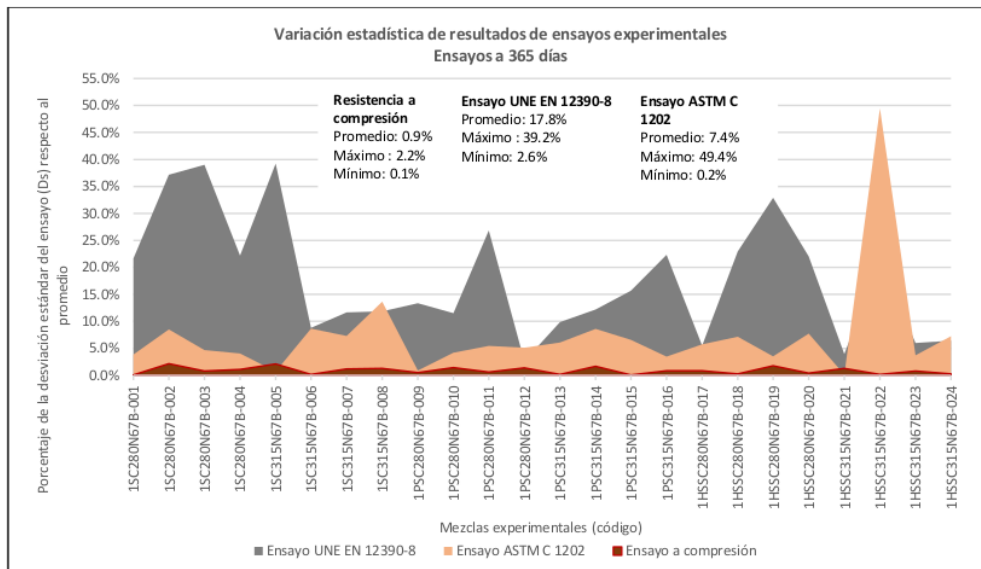


Fig. 10 Distribución comparativa de desviación entre testigos respecto al promedio del ensayo (edad 365 días).

Un factor importante para considerar, y que en parte puede explicar la mayor aleatoriedad de los resultados del método UNE, radica en la forma de medición de ambos métodos. Mientras que las lecturas experimentales del método ASTM se registran de forma automática en señales eléctricas producto de la reacción electroquímica, el método UNE depende de la inspección visual del operador (calculado en mm) sobre la penetración física del agua en la matriz de concreto, sin distinción de la forma de dicha penetración.

Cabe señalar que, en otras regiones, principalmente Europa, los contenidos de cemento empleados en las mezclas de concreto industrial y en particular los tipos de cemento, son muy diferentes a los empleados en el Perú y con mayor participación en el m³ de concreto. Dado que los mercados europeos usan cementos con mayor cantidad de adiciones y diferente fineza de estas, así como relaciones a/c menores, es de esperar que los problemas de inconsistencia del método UNE, no sean un problema mayor, como se ha visto en el presente estudio usando los materiales peruanos.

6. Discusión de resultados

Las premisas base del modelo clásico de permeabilidad peruano, que como ya se ha comentado origina en la corriente norteamericana de ³⁶ACI, y expresan algunos conceptos prácticos para restringir en la obra de construcción, la permeabilidad del concreto y por consecuencia asegurar su durabilidad.

El primero ²⁵ de estos corresponde al uso de la resistencia a la compresión uniaxial del concreto y su relación con la relación agua/cemento, según la cual a una relación a/c le corresponde generalmente una resistencia (considerando por supuesto la variación por desviación estándar del ensayo) en función al tipo de cemento empleado. Este criterio a su vez se basa en los métodos de diseño del ACI (de enseñanza difundida en las carreras universitarias de

Ingeniería civil en el Perú) en donde el primer paso consiste en seleccionar la relación a/c en función a la resistencia, a partir de tablas expresadas en el código de diseño.

Como se ha evidenciado en las gráficas comparativas para relaciones a/c fijas, este concepto ya no puede tomarse como preciso, considerando que la actual tecnología de producción de concreto con aditivos permite reducir significativamente la cantidad de pasta disponible dentro de una relación a/c determinada. Por el contrario, lo que se observa experimentalmente es que la resistencia aumenta o disminuye en función a la densidad de la pasta de cemento (superando la desviación estándar) y cuya magnitud la determina el tipo de cemento a emplear, donde la fineza y adiciones de este, constituyen factores determinantes.

Si bien de manera general aún se puede establecer una cierta correspondencia entre la relación a/c y la resistencia a compresión, se encuentra que el valor de P/A cambia la característica de la relación entre estos parámetros, siendo este cambio en función de P/A, específico del tipo de cemento.

Una situación diferente se tiene cuando se quiere relacionar la resistencia a compresión uniaxial con la permeabilidad, tomando como base la correspondencia general discutida anteriormente entre la relación a/c y la resistencia a compresión, debido a que el factor dominante, tal como ha mostrado los resultados experimentales, en la permeabilidad es la cantidad disponible de pasta y la fineza de esta, expresada en la relación P/A, particular por tipo de cemento.

En la figura 11 se ve claramente que para un rango estrecho de resistencia se presenta una gran cantidad de valores de permeabilidad, en función al tipo de cemento (se toma el plazo de hidratación de 28 días por ser el típico tiempo de curado de los testigos moldeados en obra en el mercado peruano). En lugar de observarse unas tendencias diagonales, lo que se muestra son alineamientos verticales de los resultados experimentales. Resulta evidente por tanto que no hay una relación directa, entre resistencia a compresión y permeabilidad, donde incluso una vinculación entre ambos valores solo podría tomarse como referencial.

Este patrón no solo se presenta en los ensayos bajo el método ASTM, también se evidencia en los resultados de ensayos bajo la metodología UNE, aunque en este caso debe tomarse en cuenta las inconsistencias ya discutidas anteriormente. Existe por tanto una doble comprobación que nos permite descartar al parámetro de resistencia a la compresión como principal referencia para vincular un valor de permeabilidad.

Es importante hacer notar, en cuanto a los resultados obtenidos, que la menor resistencia a compresión no tiene los valores más altos de permeabilidad, así como tampoco las mayores resistencias registradas tienen los menores valores de permeabilidad, abundando en la evidencia para la no linealidad de la resistencia vs. permeabilidad del concreto.

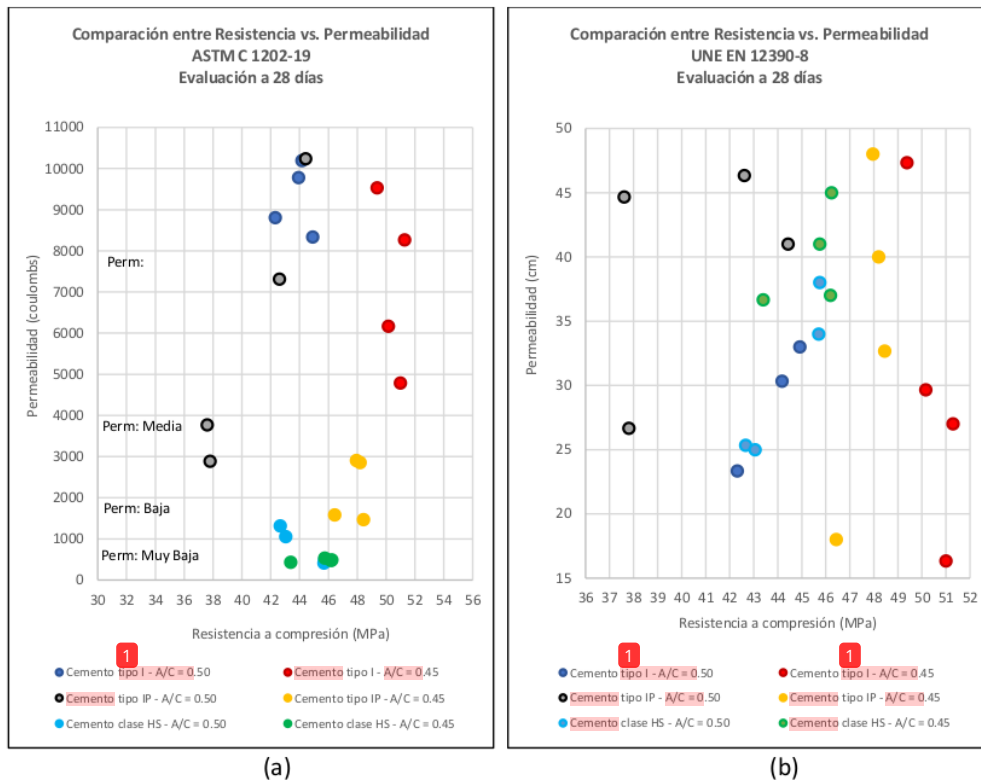


Fig. 11 (a) Distribución de resultados según método ASTM, (b) Distribución de resultados según método UNE.

La segunda premisa clásica, expresada en las tablas del reglamento peruano, consiste en fijar una relación a/c para delimitar la permeabilidad del concreto.

Si bien esto tiene una mayor correlación que lo tratado anteriormente, los resultados experimentales han demostrado que solo fijando la relación a/c e inclusive fijando también el tipo de cemento, resulta insuficiente para mantener fija (o al menos con una mínima variación) el valor de permeabilidad en el concreto.

Los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio han mostrado que el factor que restringe la permeabilidad en el concreto es la naturaleza física, y química de la pasta cementicia en el concreto, expresado en términos prácticos en la relación P/A. En la medida que se reduzca la cantidad de pasta habrá menos espacio para la formación de capilares y consecuentemente se dará una reducción de la permeabilidad en el concreto.

La densidad de la pasta cementicia, así como la formación de los productos de hidratación (estructura cristalina) durante el proceso de endurecimiento depende directamente de las características químicas del cemento, así como de su finura. Dado que la finura de los cementos adicionados, puzolánico tipo IP y categoría HS son similares, la naturaleza de las adiciones en empleadas en dichos cementos marcará la diferencia en sus respectivos

importamientos.

Como se ha podido observar los concretos con cementos adicionados presentan en general menor permeabilidad que el concreto con cemento tipo I. Ello se debe a que las adiciones generan durante la hidratación, en la fase de endurecimiento, un mayor bloqueo de la

estructura capilar al interior de la matriz de concreto, tal como lo reflejan los valores experimentales.

Por lo tanto, para definir con la máxima precisión el valor de permeabilidad en el concreto se debe caracterizar la cantidad y calidad de la pasta cementicia triangulando tres factores: definir la relación agua/cemento (a/c), definir el tipo de cemento y definir la cantidad de cemento o cantidad de agua (con lo cual se establece la cantidad de pasta en la masa de concreto).

Como ilustra la figura 12, con solo definir dos factores se obtiene aún una clara variación de la permeabilidad tanto en la relación a/c 0.50 como en la 0.45, de ello la analogía con el sistema de triangulación (a). Lo mismo, con cierto esfuerzo, puede notarse también en los resultados obtenidos con el método UNE.

Las tendencias anteriores, se repiten en la misma proporción cuando se tabulan los resultados a 365 días de hidratación en el mismo arreglo de las figuras pasadas. La diferencia por el mayor plazo de hidratación se presenta en términos de menores valores de permeabilidad y la reducción de las pendientes de tendencias al incrementarse la relación P/A, sin embargo, se arriba a las mismas conclusiones.

En la investigación experimental realizada y expuesta en el presente artículo, se han empleado en las mezclas experimentales de concreto solo los cementos de fábrica, sin considerar adiciones cementicias suplementarias, tales como las descritas en el reglamento nacional de edificaciones peruano: ceniza volante, escorias siderúrgicas, puzolanas naturales y microsílíce. Si bien en el reglamento peruano el uso de estos materiales significa que su participación se incluye en el cálculo de la relación a/c y por tanto pueden ser usados en reemplazo parcial del cemento, la naturaleza de la pasta cambia al alterarse la fineza del cementicio y el clase de hidratación resultante durante la etapa de endurecimiento del concreto (tanto en velocidad como en el tipo de productos de hidratación a formarse). Esto tiene un impacto evidente en la formación de la estructura capilar, que como se ha explicado anteriormente, condiciona el valor de permeabilidad del concreto.

Así mismo existe otro grupo de adiciones no reactivas o de baja reactividad que se usan en conjunto con el cemento en el diseño de mezcla del concreto, como por ejemplo el microfiller de carbonato de calcio que se extrae en el preproceso de fabricación de clinker para cemento, para modificar las propiedades del concreto fresco tanto en estado fresco como endurecido. Las pastas (cemento + adición ninguna/baja reactividad + agua) que se producen con estos materiales generalmente crean una mayor cantidad de capilares que luego no son bloqueados o reducidos tal como ocurre en las pastas con solo cemento, debido a su baja o ninguna reactividad. A pesar de no tener utilidad en términos de permeabilidad, las adiciones mencionadas controlan otros efectos del concreto, como la cohesividad o la contracción. Dado que esta investigación pretende demostrar el impacto de la variable relación Pasta/Agregado, se tomó la decisión de emplear mezclas experimentales con solo cementos de fábrica, a fin de evitar introducir variables innecesarias que complicarían las demostraciones experimentales.

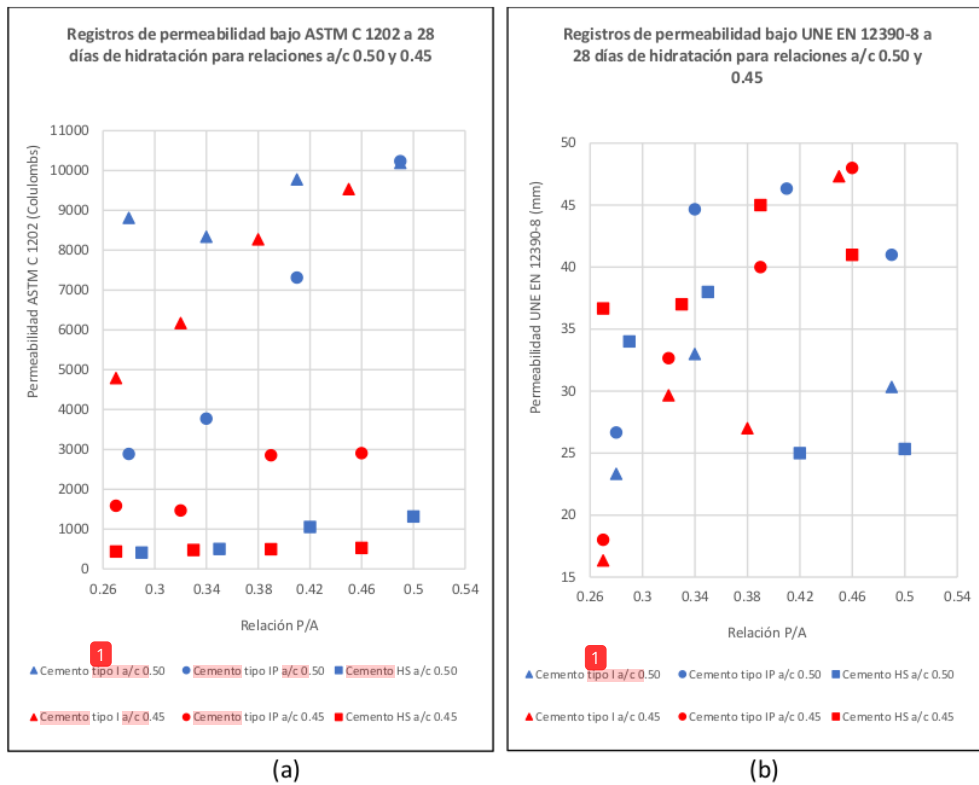


Fig. 12 (a) Segmentación de permeabilidad por tipo de cemento con resultados según el método ASTM, (b) segmentación de permeabilidad por tipo de cemento con resultados según el método UNE.

Los resultados obtenidos en cuanto permeabilidad no invalidan el modelo ya existente y normado, sino reflejan la necesidad de complementarlo para que se logre en la práctica el objetivo de restricción de la permeabilidad. El concepto nuevo, al menos para el entorno normativo peruano, que se trae a la discusión es el de considerar la microestructura de la pasta cementicia que contienen a la red capilar del cual depende la facilidad con la que el agua, soluciones líquidas o incluso los gases, puedan atravesar la masa del concreto.

Como se ha mencionado anteriormente, las pastas de cements adicionados y de estos dos la del concreto con cemento categoría HS, son las que generan una mayor dificultad para el paso del agua, bien por producir un menor número de capilares, un menor diámetro efectivo de estos o ambos efecto producto de la fineza y química particular.

Al alcanzar valores muy bajos de permeabilidad se puede observar que la tendencia se hace horizontal a pesar del cambio de la relación a/c.

7. Conclusiones

Los ensayos experimentales ejecutados cambiando la microestructura de la pasta cementicia en el concreto, expresada a través de la relación P/A, para diferentes condiciones de relación a/c y tipos de cements, han demostrado que la permeabilidad del concreto no puede delimitarse condicionando solo la relación a/c y tipo de cemento, dado que aun fijando estos

parámetros se obtienen diferentes valores de permeabilidad. Es necesario por tanto aplicar una tercera restricción para realmente definir la permeabilidad objetivo en el concreto, quedando como variación significativa únicamente la desviación estándar e incertidumbre propias del ensayo que se emplee para medir esta propiedad.

Este concepto de “triangulación” mediante la introducción de un tercer factor, debe agregarse en la normativa peruana para alcanzar, en la práctica, la intención del reglamento de garantizar la durabilidad de las estructuras vía restricción de la permeabilidad. Ello puede lograrse indicando un contenido de cemento o agua específicos o rango de dichos materiales.

Ha quedado demostrado experimentalmente que el uso exclusivo de la resistencia a la compresión como elemento que restringe de la permeabilidad carece de eficacia, dado que operan otros factores, incluso de mayor impacto, en la determinación de la configuración de la matriz cementicia, misma que gobierna la permeabilidad. Incluso si la resistencia se usa como parte de la triangulación, es decir limitar la relación a/c, el tipo de cemento y colocar un mínimo de resistencia a la compresión, tal como figura en una de las tablas del reglamento peruano, aún se tendría una fluctuación significativa de la permeabilidad, siendo que para una misma relación a/c se pueden obtener diferentes valores de resistencia y para una misma resistencia se pueden generar diferentes valores de permeabilidad. Lo mismo ocurre si se fija un máximo de resistencia, por lo que insistir en el uso de dicho factor resulta inútil.

El concepto técnico propuesto consiste en limitar la formación de capilares y vacíos que producen permeabilidad en el concreto y ello se logra restringiendo la cantidad de material, agua y cemento, la relación entre estos y la fineza de la pasta (tipo de cemento y adiciones cementicias).

Respecto a los métodos para medir la permeabilidad, si bien a priori no se descarta ninguno de estos, resulta evidente que el más adecuado, al menos para los materiales peruanos, corresponde al ensayo según ASTM C 1202 el cual permite obtener el mejor ajuste lineal y consistencia de los datos experimentales para un rango mayor de relaciones a/c. Si bien es un método más rápido respecto al europeo, demanda un trabajo previo con las muestras que le añaden complejidad. Cabe señalar que el método de la medición de la permeabilidad por presión de agua según UNE EN 12390-8, puede refinarse al combinarse con la fórmula de Valenta, a fin de obtener un coeficiente numérico de permeabilidad con menor dependencia de la medición directa del operario. Sin embargo, aún en este caso se deberá tener en cuenta los factores que afecta este método de ensayo como la porosidad del testigo, diferencias de compactación, e incluso el tiempo de curado, los cuales incluso aumentan su impacto a medida que se incrementa la relación a/c [41].

A partir de los hallazgos del presente estudio queda por explorar en futuras investigaciones, las variaciones propias de cada método de evaluación de permeabilidad (desviación estándar e incertidumbre) a fin de incrementar la precisión de dichas metodologías y permitir el descarte de valores atípicos que puedan colarse dentro de los datos de ensayo.

Debe contemplarse también el efecto del uso de adiciones, reactivas o no, en las pastas de cemento, dado que es muy común su uso para modificar las propiedades del concreto y obtener diferentes beneficios. En este aspecto es necesario señalar que las mezclas con solo cemento en las pastas cementicias en la práctica pueden no ser las apropiadas para algunos tipos de estructuras bien sea por su geometría particular o exposición a un entorno químico dañino. En estos casos la solución pasa por el uso de los materiales cementicios

suplementarios y sus análogos, por lo que existe la necesidad de investigar el comportamiento de estos materiales en el campo de la permeabilidad.

Cabe indicar que, si bien las pastas con solo cemento generan buenos resultados en términos de permeabilidad, debe considerarse también que, a mayor contenido de cemento, se incrementa también la contracción producida por la reacción de hidratación y fragua en el concreto, incluso si el contenido no es tan elevado. Las fisuras que se producen por estos esfuerzos de contracción no controlados, generan un aumento de la permeabilidad general del concreto dado que facilitan vías de ingreso de soluciones acuosas a través de la masa de concreto, ocasionando problemas de corrosión e incluso deterioro a la masa misma del concreto [42].

Dado que la fisuración en el concreto es un fenómeno con aleatoriedad considerable que depende de una multitud de factores, tanto de la estructura como del concreto y su tratamiento en obra, no se ha considerado esta variable en el presente estudio, sin embargo, es importante hacer notar que este también constituye un parámetro que afecta la permeabilidad real del concreto en las estructuras y por consecuencia su durabilidad.

Finalmente, el análisis de la microestructura particular de los materiales con los que se ha trabajado, merece su propia línea de investigación por lo que se recomienda evaluar las matrices cementicias para variaciones de relación P/A a través de herramientas petrográficas, a fin de identificar y comparar la naturaleza de los capilares y vacíos formados en cada situación así como el impacto de patologías propias de la mecánica interna del concreto como microfisuras, reacciones de los agregados, incorporación de aire, interfase pasta-agregado, etc.

En base a ⁵⁶ la investigación desarrollada en el presente artículo, se recomienda continuar la investigación del impacto de la relación Pasta/Agregado en el concreto, buscando encontrar la precisión en la medición de la permeabilidad para los métodos de ensayo utilizados, tanto el método ASTM como el europeo UNE EN, aplicando un número importante de réplicas para tener ³¹ una estadística de resultados con mayor representatividad.

Otra línea de investigación que se abre a partir de lo expuesto es la de investigar el efecto que tiene la adición de materiales ultrafinos, no cementicios (sin actividad puzolánica), como es el polvo de carbonato de calcio que resulta como subproducto de la fabricación del cemento, comúnmente conocido como CKD (cement Kiln Dust).

Referencias

- [1] Shamsad Ahmad, Reinforcement Corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review (2003) *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, p. 459–471. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00086-0)
- [2] Congqi Fang, Karin Lundgren, Liuguo Chen, Chaoying Zhu, Corrosion influence on bond in reinforced concrete (2004) *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, p. 2159–2167. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.006>
- [3] N.R. Buenfeld, J.B. Newman, The permeability of concrete in a marine environment (1984) *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36, Ed. 127, p. 67–80. <https://doi.org/10.1680/mac.1984.36.127.67>

- [4] Douglas N. Winslow, Ding Liu, The Pore Structure of Paste in Concrete (1990) *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, p. 227-235. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90075-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90075-9)
- [5] S. Kolas, C. Georgiou, The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete (2005) *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, Ed. 2, p. 211 – 216. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.009>
- [6] Haoliang Huang, Chunxiang Qian, Fei Zhao, Jun Qu, Jingqiang Guo, Michael Danzinger, Improvement on microstructure of concrete by polycarboxylate superplasticizer (PCE) and its influence on durability of concrete (2016) *Construction and Building Materials*, Vol. 110, p. 293 – 299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.041>
- [7] Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Assia Djerbi, Mariusz Kaczmarek, Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/ cement ratio and water content (2006) *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, p. 625-633. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>
- [8] José Luis García Calvo, Mercedes Sánchez Moreno, Pedro Carballosa, Filipe Pedrosa, Fabiano Tavares, Improvement of the Concrete Permeability by Using Hydrophilic Blended Additive (2019) *MDPI Materials*, Vol. 12, No. 2384. <https://doi.org/10.3390/ma12152384>
- [9] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Norma Técnica Peruana de Edificación E060 Concreto Armado (2009), t. 4.2 y 4.4.
- [10] José Milla, Tara L. Cavalline, Tyson D. Rupnow, Bharath Melugiri-Shankaramurthy, Gilson Lomboy, Kejin Wang, Methods of Test for Concrete Permeability: A Critical Review (2021), *Advances in Civil Engineering*, Vol. 10, No. 1. <https://doi.org/10.1520/acem20200067>
- [11] S.B. Singh, Pankaj Munjal, Nimesh Thammishetti, Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar (2015) *Journal of Building Engineering*, Vol 4, p. 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.09.003>
- [12] American Standard and Testing Materials, Standard Specification for Portland Cement (2022) Standard 150-22.
- [13] American Standard and Testing Materials, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements (2022) Standard 595-21.
- [14] American Standard and Testing Materials, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement (2022) Standard 1157-20.
- [15] Portal web CO° Código - <https://codigo.pe/asi-la-campana-nuevo-cemento-andino-ultra>
- [16] Biondi Shaw, A., Los cementos adicionados (2015) *Construyendo Obras y Caminos Lima*, Vol. 4, No. 17, p. 50 - 53.
- [17] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, Ingeniería Civil y Arquitectura. Concretos, Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua (1998).
- [18] Instituto Nacional de Normalización de Chile, Hormigón Requisitos Generales (2016) 4th E. 2016.05.25.
- [19] Fernando Bustos, Patricia Martinez, Carlos Videla, Mauricio Lopez, Reducing concrete permeability by using natural pozzolans and reduced aggregate to paste ratio (2015) *Journal of civil engineering and management*, Vol. 21(2) p. 165-176. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802719>

- [20] J. F. Young, A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and its Influence on Permeability (1988) *ACI Symposium Publication*, Vol. 108, p. 1 – 18. <https://doi.org/10.14359/2136>
- [21] Tang Lupin, Lars-Olof Nilsson, A study of the quantitative relationship between permeability and pore size distribution of hardened cement pastes (1992) *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, Ed. 4, p. 541 – 550. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90004-F](https://doi.org/10.1016/0008-8846(92)90004-F)
- [22] D.C. Hughes, Pore structure and permeability of hardened cement paste (1985) *Magazine of Concrete Research*, Vol.37, Ed. 133, p. 227 – 233. <https://doi.org/10.1680/macrc.1985.37.133.227>
- [23] B. K. Nyame, J.M. Illston, Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste (1981) *Magazine of Concrete Research*, Vol. 33, Ed. 116, p. 139 – 146. <https://doi.org/10.1680/macrc.1981.33.116.139>
- [24] S. F. Wong, T. H. Wee, S. Swaddiwudhipong, S. L. Lee, Study of water movement in concrete (2001) *Magazine of Concrete Research*, Vol. 3, p. 205-220. <https://doi.org/10.1680/macrc.2001.53.3.205>
- [25] B. K. Nyame, Permeability of normal and lightweight mortars (1985) *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, Ed. 130, p. 44 – 48. <https://doi.org/10.1680/macrc.1985.37.130.44>
- [26] Douglas N. Winslow, Menashi D. Cohen, Dale P. Bentz, Kenneth A. Snyder, Edward J. Garboczi, Percolation and Pore Structure in Mortars and Concrete (1994) *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, p. 25-37. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90079-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90079-5)
- [27] O.A. Kayyali, Porosity of concrete in relation to the nature of the paste-aggregate interface (1987) *Materials and Structures*, Vol. 20, p. 19 – 26. <https://doi.org/10.1007/BF02472722>
- [28] Karen L. Scrivener, Alison K. Crumbie, Peter Laugesen, The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete (2004) *Interface Science*, Vol. 12, p. 411 – 421. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>
- [29] J.P. Ollivier, J.C. Maso, and B. Bourdette, Interfacial Transition Zone in Concrete (1995) *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 2, Ed. 1, p. 30 – 38. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90037-3](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90037-3)
- [30] Cristiana Gonilho Pereira, João Castro-Gomes, Luiz Pereira de Oliveira, Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete (2009) *Construction and Building Materials*, Vol. 23, p. 602-608. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.009>
- [31] S. Lu, E. N. Landis, D. T. Keane, X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in Portland cement concrete (2006) *Materials and Structures*, Vol. 39, p. 611-620. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9099-7>
- [32] Génesis Guevara Fallas, Carolina Hidalgo Madrigal, Mariannys Pizarro García, Iván Rodríguez Valenciano, Luis Diego Rojas Vega, Georgana Segura Guzmán, Efecto de la variación agua/cemento en el concreto (2012) *Tecnología en Marcha*, Vol. 25, Ed. April -June, p. 80-86.
- [33] Xinxin Li, Qing Xu, Shenghong Chen, An experimental and numerical study on water permeability of concrete (2016) *Construction and Building Materials*, Vol. 105, p. 503 – 510. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.184>
- [34] Ali Akbar Ramezani-pour, Amirreza Pilvar, Mahdi Mahdikhani, Faramarz Moodi, Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration,

- rapid chloride penetration and compressive strength (2011) *Construction and Building Materials*, Vol. 25, p. 2472-2479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>
- [35] S. P. Zhang, L. Zong, Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials (2014) *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014, Art. 650373. <https://doi.org/10.1155/2014/650373>
- [36] Rilem technical committee TC 116-PCD, Performance Criteria for Concrete Durability (1995) *Rilem Report 12*, Ed. Taylor&Francis (USA) Group.
- [37] Lulu Basheer, Joerg Kropp, David J. Cleland, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review (2001) *Construction and Building Materials*, Vol. 15, p. 93-103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)
- [38] R.P. Khatri, V. Sirivivatnanon, J.L. Yang, Role of Permeability in Sulphate Attack (1997) *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, p. 1179-1189. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00119-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00119-1)
- [39] Organismo de normalización español, Ensayos de hormigón endurecido. - Profundidad de Penetración de agua bajo presión (2001) *Part 8, UNE-EN 12390-8*.
- [40] American Standard and Testing Materials, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (2012), Standard 1202-12.
- [41] Iskra G. Bustamante, Study of the correlation between the water/cement ratio and the permeability to water of usual concrete in Peru (2017) Pontifical Catholic University of Peru - thesis repository. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8804>
- [42] Kenji Wang, Daniel C. Jansen, Surendra P. Shah, Alan F. Karr, Permeability Study of Cracked Concrete (1997) *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 3, p. 381-393. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00031-8)

Anexo I: Diseños de mezcla por variante

Cemento tipo I – Relación agua/cemento = 0.50.

Diseño de mezcla experimentales por m ³														
Insumos	Procedencia	Unidades	1SC280N67B-001 500 kg de cemento			1SC280N67B-002 450 kg de cemento			1SC280N67B-003 400 kg de cemento			1SC280N67B-004 350 kg de cemento		
			Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS
Cemento tipo I - Sol	Unacem S.A.A.	kg	500	500	500	450	450	450	400	400	400	350	350	
Agua calificada	Red Pública	L	250	270	270	225	246	246	200	223	223	175	199	
Arena procesada	Cantera Jicamarca	kg	809	809	809	867	867	867	921	921	921	977	977	
Piedra huso 67 ASTM C 33	Cantera Jicamarca	kg	734	734	734	786	786	786	835	835	835	886	886	
Aditivo Master Rheobuild 1202	Basf Perú	L	0	0	0	0	0	0	1.12	1.12	1.12	2.73	2.73	
Aditivo Master Rheobuild 2110	Basf Perú	L	1.50	1.50	1.50	1.35	1.35	1.35	2.40	2.40	2.40	2.10	2.10	
Aire Teórico	--	%	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	

Volumen de agregados	m ³	0.58	0.62	0.66	0.70
Relación Pasta/Agregado		0.49	0.41	0.34	0.28
Dosis de aditivo Master Rheobuild 1202	cm ³ por kg de cemento por m ³	0	0	2.80	7.80
Dosis de Aditivo Master Rheobuild 2110	cm ³ por kg de cemento por m ³	3.00	3.00	6.00	6.00

Tandas de prueba corregidas por humedad y absorción (0.16m ³)					
Cemento tipo I - Sol	kg	80.0	72.0	64.0	56.0
Agua calificada	L	27.9	23.4	18.4	14.6
Arena procesada	kg	142.5	153.8	164.4	172.9
Piedra huso 67 ASTM C 33	kg	117.9	126.7	134.0	142.4
Aditivo Master Rheobuild 1202	L	0	0	0.217	0.437
Aditivo Master Rheobuild 2110	L	0.305	0.274	0.488	0.336

Cond. Seca: Condición de diseño de laboratorio sin contenido de humedad en los agregados para el cálculo de la relación agua/cemento, antes de las correcciones por humedad y absorción.
Cond. SSS: Condición de diseño corregido por absorción para su carga en planta industrial de concreto o mezcladora de obra, previa corrección de humedad de agregados.

Cemento tipo I – Relación agua/cemento = 0.45.

Diseño de mezcla experimentales por m ³														
Insumos	Procedencia	Unidades	1SC315N67B-005 500 kg de cemento			1SC315N67B-006 450 kg de cemento			1SC315N67B-007 400 kg de cemento			1SC315N67B-008 350 kg de cemento		
			Cond. Seca	Cond. SSS	Unidades	Cond. Seca	Cond. SSS	Unidades	Cond. Seca	Cond. SSS	Unidades	Cond. Seca	Cond. SSS	Unidades
Cemento tipo I - Sol	Unacem S.A.A.	kg	500	500		450	450		400	400		350	350	
Agua calificada	Red Pública	L	225	246		203	225		180	203		158	183	
Arena procesada	Cantera Jicamarca	kg	842	842		894	894		946	946		997	997	
Piedra huso 67 ASTM C 33	Cantera Jicamarca	kg	764	764		810	810		858	858		904	904	
Aditivo Master Rheobuild 1202	Basf Perú	L	0			1.71			3.20			5.25		
Aditivo Master Rheobuild 2110	Basf Perú	L	3.0			2.70			2.40			2.10		
Aire Teórico	--	%	1.0			1.0			1.0			1.0		

Volumen de agregados		m ³	0.60			0.64			0.68			0.71		
Relación Pasta/Agregado		--	0.45			0.38			0.32			0.27		
Dosis de aditivo Master Rheobuild 1202		cm ³ por kg de cemento por m ³	0			3.80			8.00			15.00		
Dosis de Aditivo Master Rheobuild 2110		cm ³ por kg de cemento por m ³	6.00			6.00			6.00			6.00		

Tandas de prueba corregidas por humedad y absorción (0.16m ³)															
Cemento tipo I - Sol	Agua calificada	Arena procesada	Piedra huso 67 ASTM C 33	Aditivo Master Rheobuild 1202	Aditivo Master Rheobuild 2110	Unidades	1SC315N67B-005 500 kg de cemento			1SC315N67B-006 450 kg de cemento			1SC315N67B-007 400 kg de cemento		
							Cond. Seca	Cond. SSS	Unidades	Cond. Seca	Cond. SSS	Unidades	Cond. Seca	Cond. SSS	Unidades
						kg	80.0			72.0			64.0		
						L	27.1			20.9			17.1		
						kg	146.5			157.3			165.9		
						kg	122.7			130.4			138.2		
						L	0			0.274			0.512		
						L	0.480			0.432			0.384		

Cond. Seca: Condición de diseño de laboratorio sin contenido de humedad en los agregados para el cálculo de la relación agua/cemento, antes de las correcciones por humedad y absorción.
 Cond. SSS: Condición de diseño corregido por absorción para su carga en planta industrial de concreto o mezcladora de obra, previa corrección de humedad de agregados.

Cemento tipo IP – Relación agua/cemento = 0.50.

Diseño de mezcla experimentales por m ³														
Insumos	Procedencia	Unidades	1PSC280N67B-009 500 kg de cemento			1PSC280N67B-010 450 kg de cemento			1PSC280N67B-011 400 kg de cemento			1PSC280N67B-012 350 kg de cemento		
			Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS
Cemento tipo IP - Atlas	Unacem S.A.A.	kg	500	500	500	450	450	450	400	400	400	350	350	
Agua calificada	Red Pública	L	250	270	270	225	246	200	200	223	175	199		
Arena procesada	Cantera Jicamarca	kg	801	801	801	858	858	915	915	915	971	971		
Piedra huso 67 ASTM C 33	Cantera Jicamarca	kg	727	727	727	778	778	829	829	829	881	881		
Aditivo Master Rheobuild 1202	Basf Perú	L	0			0.90		2.08			3.26			
Aditivo Master Rheobuild 2110	Basf Perú	L	2.60			2.70		2.40			2.10			
Aire Teórico	--	%	1.0			1.0		1.0			1.0			

Volumen de agregados		m ³	0.57			0.61		0.65			0.69		
Relación Pasta/Agregado			0.49			0.41		0.34			0.28		
Dosis de aditivo Master Rheobuild 1202		cm ³ por kg de cemento por m ³	0			2.00		5.20			9.30		
Dosis de Aditivo Master Rheobuild 2110		cm ³ por kg de cemento por m ³	5.20			6.00		6.00			6.00		

Tandas de prueba corregidas por humedad y absorción (0.16m ³)																	
Cemento tipo IP - Atlas	Agua calificada	Arena procesada	Piedra huso 67 ASTM C 33	Aditivo Master Rheobuild 1202	Aditivo Master Rheobuild 2110	Condición de diseño			Condición de laboratorio								
						Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS						
80.0	29.8	140.9	116.9	0	0.416	72.0	24.6	151.5	125.0	0.144	0.432	64.0	21.0	160.1	133.6	0.333	0.384
56.0	17.3	168.8	142.1	0.521	0.336												

Cond. Seca: Condición de laboratorio sin contenido de humedad en los agregados para el cálculo de la relación agua/cemento, antes de las correcciones por humedad y absorción.
 Cond. SSS: Condición de diseño corregido por absorción para su carga en planta industrial de concreto o mezcladora de obra, previa corrección de humedad de agregados.

Cemento tipo IP – Relación agua/cemento = 0.45.

Diseño de mezcla experimentales por m ³														
Insumos	Procedencia	Unidades	1PSC315N67B-013 500 kg de cemento			1PSC315N67B-014 450 kg de cemento			1PSC315N67B-015 400 kg de cemento			1PSC315N67B-016 350 kg de cemento		
			Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS	Cond.	Seca	SSS
Cemento tipo IP - Atlas	Unacem S.A.A.	kg	500	500	500	450	450	450	400	400	400	350	350	
Agua calificada	Red Pública	L	225	246	246	203	225	225	180	203	203	158	183	
Arena procesada	Cantera Jicamarca	kg	834	834	834	886	886	886	941	941	941	991	991	
Piedra huso 67 ASTM C 33	Cantera Jicamarca	kg	757	757	757	804	804	804	853	853	853	899	899	
Aditivo Master Rheobuild 1202	Basf Perú	L	0.90			2.48			3.20			6.13		
Aditivo Master Rheobuild 2110	Basf Perú	L	3.00			2.70			2.40			2.10		
Aire Teórico	--	%	1.0			1.0			1.0			1.0		

Volumen de agregados		m ³	0.60			0.63			0.67			0.71	
Relación Pasta/Agregado			0.46			0.39			0.32			0.27	
Dosis de aditivo Master Rheobuild 1202		cm ³ por kg de cemento por m ³	1.80			5.50			8.00			17.50	
Dosis de Aditivo Master Rheobuild 2110		cm ³ por kg de cemento por m ³	6.00			6.00			6.00			6.00	

Tandas de prueba corregidas por humedad y absorción (0.16m ³)													
Cemento tipo IP - Atlas		kg	80.0			72.0			64.0			56.0	
Agua calificada		L	27.2			23.4			18.6			11.4	
Arena procesada		kg	145.0			153.5			163.9			175.7	
Piedra huso 67 ASTM C 33		kg	121.1			129.5			137.2			144.5	
Aditivo Master Rheobuild 1202		L	0.144			0.396			0.512			0.980	
Aditivo Master Rheobuild 2110		L	0.480			0.432			0.384			0.336	

Cond. Seca: Condición de diseño de laboratorio sin contenido de humedad en los agregados para el cálculo de la relación agua/cemento, antes de las correcciones por humedad y absorción.
 Cond. SSS: Condición de diseño corregido por absorción para su carga en planta industrial de concreto o mezcladora de obra, previa corrección de humedad de agregados.

Cemento categoría HS – Relación agua/cemento = 0.50.

Diseño de mezcla experimentales por m ³												
Insumos	Procedencia	Unidades	1HSSC280N67B-017 500 kg de cemento		1HSSC280N67B-018 450 kg de cemento		1HSSC280N67B-019 400 kg de cemento		1HSSC280N67B-020 350 kg de cemento			
			Cond. Seca	Cond. SSS	Cond. Seca	Cond. SSS	Cond. Seca	Cond. SSS	Cond. Seca	Cond. SSS		
Cemento categoría HS	Unacem S.A.A.	kg	500	500	450	450	400	400	350	350		
Andino Ultra												
Agua calificada	Red Pública	L	250	270	225	246	200	222	175	199		
Arena procesada	Cantera Jicamarca	kg	791	791	848	848	906	906	964	964		
Piedra huso 67 ASTM C 33	Cantera Jicamarca	kg	717	717	769	769	822	822	874	874		
Aditivo Master Rheobuild 1202	Basf Perú	L	0	0	1.13	1.13	2.20	2.20	3.57	3.57		
Aditivo Master Rheobuild 2110	Basf Perú	L	3.00	3.00	3.43	3.43	2.40	2.40	2.10	2.10		
Aire Teórico	--	%	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		

Volumen de agregados		m ³	0.57	0.57	0.61	0.61	0.65	0.65	0.69	0.69
Relación Pasta/Agregado		--	0.50	0.50	0.42	0.42	0.35	0.35	0.29	0.29
Dosis de aditivo Master Rheobuild 1202		cm ³ por kg de cemento por m ³	0	0	2.50	2.50	5.50	5.50	10.20	10.20
Dosis de Aditivo Master Rheobuild 2110		cm ³ por kg de cemento por m ³	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00

Tandas de prueba corregidas por humedad y absorción (0.16m ³)										
Cemento categoría HS - Andino Ultra		kg	80.0	80.0	72.0	72.0	64.0	64.0	56.0	56.0
Agua calificada		L	30.3	30.3	26.0	26.0	21.4	21.4	17.8	17.8
Arena procesada		kg	138.8	138.8	148.6	148.6	158.4	158.4	167.3	167.3
Piedra huso 67 ASTM C 33		kg	115.2	115.2	123.6	123.6	132.3	132.3	140.7	140.7
Aditivo Master Rheobuild 1202		L	0	0	0.180	0.180	0.352	0.352	0.571	0.571
Aditivo Master Rheobuild 2110		L	0.480	0.480	0.432	0.432	0.384	0.384	0.336	0.336

Cond. Seca: Condición de diseño de laboratorio sin contenido de humedad en los agregados para el cálculo de la relación agua/cemento, antes de las correcciones por humedad y absorción.
 Cond. SSS: Condición de diseño corregido por absorción para su carga en planta industrial de concreto o mezcladora de obra, previa corrección de humedad de agregados.

Cemento categoría HS – Relación agua/cemento = 0.45.

Diseño de mezcla experimentales por m ³												
Insumos	Procedencia	Unidades	1HSSC315N67B-021 500 kg de cemento		1HSSC315N67B-022 450 kg de cemento		1HSSC315N67B-023 400 kg de cemento		1HSSC315N67B-024 350 kg de cemento			
			Cond. Seca	Cond. SSS	Cond. Seca	Cond. SSS	Cond. Seca	Cond. SSS	Cond. Seca	Cond. SSS		
Cemento categoría HS	Unacem S.A.A.	kg	500	500	450	450	400	400	350	350		
Andino Ultra												
Agua calificada	Red Pública	L	225	245	203	225	180	203	158	182		
Arena procesada	Cantera Jicamarca	kg	822	822	877	877	933	933	986	986		
Piedra huso 67 ASTM C 33	Cantera Jicamarca	kg	745	745	795	795	845	845	894	894		
Aditivo Master Rheobuild 1202	Basf Perú	L	2.50		2.93		3.40		4.38			
Aditivo Master Rheobuild 2110	Basf Perú	L	3.00		2.70		2.40		2.10			
Aire Teórico	--	%	1.0		1.0		1.0		1.0			

Volumen de agregados		m ³	0.59		0.63		0.67		0.71
Relación Pasta/Agregado		--	0.46		0.39		0.33		0.27
Dosis de aditivo Master Rheobuild 1202		cm ³ por kg de cemento por m ³	5.00		6.50		8.50		12.50
Dosis de Aditivo Master Rheobuild 2110		cm ³ por kg de cemento por m ³	6.00		6.00		6.00		6.00

Tandas de prueba corregidas por humedad y absorción (0.16m ³)										
Cemento categoría HS - Andino Ultra		kg	80.0		72.0		64.0		56.0	
Agua calificada		L	25.5		21.2		18.4		14.8	
Arena procesada		kg	144.4		154.0		162.4		171.2	
Piedra huso 67 ASTM C 33		kg	120.0		128.2		136.2		144.0	
Aditivo Master Rheobuild 1202		L	0.400		0.468		0.544		0.700	
Aditivo Master Rheobuild 2110		L	0.480		0.432		0.384		0.336	

Cond. Seca: Condición de diseño de laboratorio sin contenido de humedad en los agregados para el cálculo de la relación agua/cemento, antes de las correcciones por humedad y absorción.
Cond. SSS: Condición de diseño corregido por absorción para su carga en planta industrial de concreto o mezcladora de obra, previa corrección de humedad de agregados.

Anexo II: Tablas de resultados de ensayos

Resultados promedio de resistencia a la compresión uniaxial Variante tipo I						
CEMENTO PORTLAND TIPO I – Cemento SOL T-I						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Resistencia a compresión 28 días de hidratación (MPa)	Resistencia a compresión 365 días de hidratación (MPa)	Relación Pasta / Agregado	Resistencia a compresión 28 días de hidratación (MPa)	Resistencia a compresión 365 días de hidratación (MPa)
500	0.49	44.2	49.4	0.45	49.4	53.7
450	0.41	43.9	47.5	0.38	51.3	54.5
400	0.34	44.9	54.9	0.32	50.2	54.1
350	0.28	42.3	48.4	0.27	51.0	53.3

Resultados promedio de resistencia a la compresión uniaxial Variante tipo IP						
CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP – Cemento ATLAS IP						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Resistencia a compresión 28 días de hidratación (MPa)	Resistencia a compresión 365 días de hidratación (MPa)	Relación Pasta / Agregado	Resistencia a compresión 28 días de hidratación (MPa)	Resistencia a compresión 365 días de hidratación (MPa)
500	0.49	44.4	49.0	0.46	48.0	51.8
450	0.41	42.6	48.2	0.39	48.2	52.4
400	0.34	37.6	45.9	0.32	48.4	53.4
350	0.28	37.8	46.0	0.27	46.4	52.7

Resultados promedio de resistencia a la compresión uniaxial Variante categoría HS						
CEMENTO CATEGORÍA HS – Cemento Andino Ultra HS						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Resistencia a compresión 28 días de hidratación (MPa)	Resistencia a compresión 365 días de hidratación (MPa)	Relación Pasta / Agregado	Resistencia a compresión 28 días de hidratación (MPa)	Resistencia a compresión 365 días de hidratación (MPa)
500	0.50	42.7	52.7	0.46	45.7	53.6
450	0.42	43.1	53.3	0.39	46.2	56.1
400	0.35	45.7	54.7	0.33	46.2	53.7
350	0.29	45.7	56.4	0.27	43.4	51.6

Resultados promedio de permeabilidad UNE EN 12390-8 Variante tipo I						
CEMENTO PORTLAND TIPO I – Cemento SOL T-I						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (mm)	Permeabilidad 365 días de hidratación (mm)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (mm)	Permeabilidad 365 días de hidratación (mm)
500	0.49	30	19	0.45	47	24
450	0.41	97*	27	0.38	27	28
400	0.34	33	23	0.32	30	21
350	0.28	23	23	0.27	16	17

(*) Este resultado corresponde a un valor atípico, debido a falla local en el testigo al momento de la medición.

Resultados promedio de permeabilidad UNE EN 12390-8 Variante tipo IP						
CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP – Cemento ATLAS IP						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (mm)	Permeabilidad 365 días de hidratación (mm)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (mm)	Permeabilidad 365 días de hidratación (mm)
500	0.49	41	22	0.46	48	36
450	0.41	46	33	0.39	40	32
400	0.34	45	47	0.32	33	29
350	0.28	27	31	0.27	18	24

Resultados promedio de permeabilidad UNE EN 12390-8 Variante categoría HS						
CEMENTO CATEGORÍA HS – Cemento ANDINO ULTRA HS						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (mm)	Permeabilidad 365 días de hidratación (mm)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (mm)	Permeabilidad 365 días de hidratación (mm)
500	0.50	25	23	0.46	41	32
450	0.42	25	27	0.39	45	35
400	0.35	38	28	0.33	37	28
350	0.29	34	25	0.27	37	26

Resultados promedio de permeabilidad ASTM C 1202 Variante tipo I						
CEMENTO PORTLAND TIPO I – Cemento SOL T-I						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (Coulombs)	Permeabilidad 365 días de hidratación (Coulombs)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (Coulombs)	Permeabilidad 365 días de hidratación (Coulombs)
500	0.49	10192	6489	0.45	9533	4656
450	0.41	9777	5165	0.38	8269	3048
400	0.34	8337	3823	0.32	6169	3278
350	0.28	8808	3048	0.27	4791	1934

Tabla 24: Resultados promedio de permeabilidad ASTM C 1202 Variante tipo IP						
CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP – Cemento ATLAS IP						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (Coulombs)	Permeabilidad 365 días de hidratación (Coulombs)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (Coulombs)	Permeabilidad 365 días de hidratación (Coulombs)
500	0.49	10237	4870	0.46	2905	2187
450	0.41	7313	3211	0.39	2852	1604
400	0.34	3773	2480	0.32	1469	1632
350	0.28	2886	1778	0.27	1582	791

Tabla 25: Resultados promedio de permeabilidad ASTM C 1202 Variante categoría HS						
CEMENTO CATEGORÍA HS – Cemento ANDINO ULTRA HS						
	Relación a/c = 0.50			Relación a/c = 0.45		
Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (Coulombs)	Permeabilidad 365 días de hidratación (Coulombs)	Relación Pasta / Agregado	Permeabilidad 28 días de hidratación (Coulombs)	Permeabilidad 365 días de hidratación (Coulombs)
500	0.50	1315	625	0.46	530	535
450	0.42	1052	501	0.39	491	220
400	0.35	502	400	0.33	475	405
350	0.29	412	391	0.27	434	370

Anexo III: Variación porcentual de resultados de testigos por mezcla experimental y por ensayo.

RESULTADOS DE ENSAYOS A 28 DÍAS													
Mezcla Experimental			Ensayo a compresión			Ensayo UNE EN 12390-8			Ensayo ASTM C 1202				
Código	Relación P/A	Relación a/c	Tipo de cemento	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	%	Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	%	Promedio (Coulombs)	Desviación (Coulombs)	%	
1SC280N67B-001	0.49	0.50	Portland tipo I	44	0.44	1.0	30.3	4.5	14.8	10192	213.2	2.1	
1SC280N67B-002	0.41	0.50	Portland tipo I	44	0.29	0.7	96.7	10.9	11.2	9777	384.1	3.9	
1SC280N67B-003	0.34	0.50	Portland tipo I	45	1.08	2.4	33.0	5.9	17.8	8337	398.4	4.8	
1SC280N67B-004	0.28	0.50	Portland tipo I	42	0.83	2.0	23.3	2.4	10.1	8808	537.8	6.1	
1SC315N67B-005	0.45	0.45	Portland tipo I	49	0.05	0.1	47.3	13.3	28.1	9533	369.8	3.9	
1SC315N67B-006	0.38	0.45	Portland tipo I	51	0.39	0.8	27.0	2.9	10.9	8269	702.1	8.5	
1SC315N67B-007	0.32	0.45	Portland tipo I	50	0.25	0.5	29.7	3.7	12.4	6169	719.0	11.7	
1SC315N67B-008	0.27	0.45	Portland tipo I	51	0.78	1.5	16.3	1.9	11.5	4791	909.7	19.0	
1PSC280N67B-009	0.49	0.50	Puzolánico tipo IP	44	0.00	0.0	41.0	6.7	16.3	10237	134.6	1.3	
1PSC280N67B-010	0.41	0.50	Puzolánico tipo IP	43	0.74	1.7	46.3	17.7	38.3	7313	577.3	7.9	
1PSC280N67B-011	0.34	0.50	Puzolánico tipo IP	38	0.93	2.5	44.7	18.4	41.2	3773	544.0	14.4	
1PSC280N67B-012	0.28	0.50	Puzolánico tipo IP	38	0.15	0.4	26.7	1.2	4.7	2886	96.0	3.3	
1PSC315N67B-013	0.46	0.45	Puzolánico tipo IP	48	0.49	1.0	48.0	8.5	17.8	2905	307.4	10.6	
1PSC315N67B-014	0.39	0.45	Puzolánico tipo IP	48	0.64	1.3	40.0	9.1	22.7	2852	20.5	0.7	
1PSC315N67B-015	0.32	0.45	Puzolánico tipo IP	48	0.39	0.8	32.7	7.4	22.7	1469	37.6	2.6	
1PSC315N67B-016	0.27	0.45	Puzolánico tipo IP	46	0.44	1.0	18.0	2.8	15.7	1582	35.8	2.3	
1HSSC280N67B-017	0.5	0.50	Clase HS	43	0.49	1.1	25.3	1.7	6.7	1315	113.5	8.6	
1HSSC280N67B-018	0.42	0.50	Clase HS	43	0.10	0.2	25.0	4.1	16.3	1052	87.9	8.4	
1HSSC280N67B-019	0.35	0.50	Clase HS	46	0.44	1.0	38.0	5.0	13.1	502	94.6	18.8	
1HSSC280N67B-020	0.29	0.50	Clase HS	46	0.29	0.6	34.0	4.3	12.7	412	26.2	6.4	
1HSSC315N67B-021	0.46	0.45	Clase HS	46	0.64	1.4	41.0	6.4	15.6	530	82.0	15.5	
1HSSC315N67B-022	0.39	0.45	Clase HS	46	0.74	1.6	45.0	4.3	9.6	491	11.9	2.4	
1HSSC315N67B-023	0.33	0.45	Clase HS	46	0.78	1.7	37.0	8.6	23.2	475	35.1	7.4	
1HSSC315N67B-024	0.27	0.45	Clase HS	43	0.15	0.3	36.7	5.8	15.8	434	30.3	7.0	
				Promedio		1.1		Promedio		17.1		Promedio	7.4
				Máximo		2.5		Máximo		41.2		Máximo	19.0
				Mínimo		0.0		Mínimo		4.7		Mínimo	0.7

RESULTADOS DE ENSAYOS A 365 DÍAS

Mezcla Experimental				Ensayo a compresión			Ensayo UNE EN 12390-8			Ensayo ASTM C 1202		
Código	Relación P/A	Relación a/c	Tipo de cemento	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	%	Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	%	Promedio (Coulombs)	Desviación estándar (Coulombs)	%
1SC280N67B-001	0.49	0.50	Portland tipo I	49	0.0	0.1	19.3	4.2	21.7%	6489	251.2	3.9
1SC280N67B-002	0.41	0.50	Portland tipo I	48	1.0	2.2	27.0	10.0	37.2%	5165	439.2	8.5
1SC280N67B-003	0.34	0.50	Portland tipo I	55	0.4	0.8	23.3	9.1	39.0%	3823	179.8	4.7
1SC280N67B-004	0.28	0.50	Portland tipo I	48	0.5	1.1	23.0	5.1	22.2%	3048	123.1	4.0
1SC315N67B-005	0.45	0.45	Portland tipo I	54	1.1	2.1	24.0	9.4	39.2%	4656	34.1	0.7
1SC315N67B-006	0.38	0.45	Portland tipo I	55	0.1	0.2	28.3	2.5	8.8%	3048	263.7	8.7
1SC315N67B-007	0.32	0.45	Portland tipo I	54	0.6	1.2	21.3	2.5	11.7%	3278	238.9	7.3
1SC315N67B-008	0.27	0.45	Portland tipo I	53	0.7	1.3	17.3	2.1	11.9%	1934	264.2	13.7
1PSC280N67B-009	0.49	0.50	Puzolánico tipo IP	49	0.2	0.5	22.0	2.9	13.4%	4870	44.0	0.9
1PSC280N67B-010	0.41	0.50	Puzolánico tipo IP	48	0.7	1.4	32.7	3.8	11.5%	3211	135.1	4.2
1PSC280N67B-011	0.34	0.50	Puzolánico tipo IP	46	0.3	0.6	47.3	12.7	26.9%	2480	135.6	5.5
1PSC280N67B-012	0.28	0.50	Puzolánico tipo IP	46	0.6	1.4	31.0	0.8	2.6%	1778	91.0	5.1
1PSC315N67B-013	0.46	0.45	Puzolánico tipo IP	52	0.1	0.2	36.0	3.6	9.9%	2187	133.2	6.1
1PSC315N67B-014	0.39	0.45	Puzolánico tipo IP	52	0.9	1.7	31.7	3.9	12.2%	1604	137.9	8.6
1PSC315N67B-015	0.32	0.45	Puzolánico tipo IP	53	0.0	0.1	28.7	4.5	15.7%	1632	107.4	6.6
1PSC315N67B-016	0.27	0.45	Puzolánico tipo IP	53	0.4	0.8	24.3	5.4	22.3%	791	27.4	3.5
1HSSC280N67B-017	0.5	0.50	Clase HS	53	0.4	0.8	22.7	1.2	5.5%	625	36.1	5.8
1HSSC280N67B-018	0.42	0.50	Clase HS	53	0.1	0.3	26.7	6.1	23.0%	501	35.8	7.1
1HSSC280N67B-019	0.35	0.50	Clase HS	55	1.0	1.8	27.7	9.1	32.9%	400	14.1	3.5
1HSSC280N67B-020	0.29	0.50	Clase HS	56	0.2	0.4	24.7	5.4	22.0%	391	30.3	7.7
1HSSC315N67B-021	0.46	0.45	Clase HS	54	0.7	1.3	31.7	1.2	3.9%	535	0.8	0.2
1HSSC315N67B-022	0.39	0.45	Clase HS	56	0.1	0.2	34.7	7.3	21.1%	220	108.6	49.4
1HSSC315N67B-023	0.33	0.45	Clase HS	54	0.4	0.8	28.3	1.7	6.0%	405	15.2	3.7
1HSSC315N67B-024	0.27	0.45	Clase HS	52	0.1	0.3	26.3	1.7	6.5%	370	26.9	7.3
				Promedio		0.9	Promedio		17.8		Promedio	7.4
				Máximo		2.2	Máximo		39.2		Máximo	49.4
				Mínimo		0.1	Mínimo		2.6		Mínimo	0.2

Primera entrega

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

- | | | |
|---|--|-----|
| 1 | Ruiz García Norman. "Corrosion en concreto armado en presencia de cloruros : efecto del tipo de cemento y de la relacion agua-cemento", TESIUNAM, 1996
Publicación | 1% |
| 2 | repositorio.utea.edu.pe
Fuente de Internet | 1% |
| 3 | hdl.handle.net
Fuente de Internet | 1% |
| 4 | archive.org
Fuente de Internet | <1% |
| 5 | Vivián Andrea Ulloa Mayorga. "Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado: Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino", 'Universitat Politecnica de Valencia', 2015
Fuente de Internet | <1% |
| 6 | repositorio.unal.edu.co
Fuente de Internet | <1% |
-

7	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
8	repositoriodigital.uns.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
9	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
10	www.fio.unicen.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
11	Submitted to Universidad Nacional de Colombia Trabajo del estudiante	<1 %
12	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
15	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
16	M. Sabesinsky Felperinl. "Genenal remarks on Portland cement concretes and a basis for their design", Materiales de Construcción, 2013 Publicación	<1 %

17	lume.ufrgs.br Fuente de Internet	<1 %
18	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet	<1 %
19	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
23	www.revistaalconpat.org Fuente de Internet	<1 %
24	"Efecto del curado interno en hormigones y su aplicación como método complementario al curado tradicional en obra del hormigón.", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2016 Publicación	<1 %
25	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	sena.edu.co Fuente de Internet	<1 %
27	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %

28

eprints.uanl.mx

Fuente de Internet

<1 %

29

K. Van Breugel, T. A. Van Beek. "Ageing of old and modern concrete structures – Observations and research", Revista ALCONPAT, 2017

Publicación

<1 %

30

Submitted to Universitat Politècnica de València

Trabajo del estudiante

<1 %

31

www.iingen.unam.mx

Fuente de Internet

<1 %

32

Limon Gonzalez Lorena Margarita. "Estudio comparativo entre los efectos micro y macro-estructurales de los superfluidificantes en el concreto y las pastas de cemento Portland", TESIUNAM, 1985

Publicación

<1 %

33

es.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

34

harvardmun.org

Fuente de Internet

<1 %

35

materconstrucc.revistas.csic.es

Fuente de Internet

<1 %

36

posgradoconstruccion.uas.edu.mx

Fuente de Internet

<1 %

37	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
38	aprendeonline.udea.edu.co Fuente de Internet	<1 %
39	cedi.ucr.ac.cr Fuente de Internet	<1 %
40	doczz.it Fuente de Internet	<1 %
41	repository.usta.edu.co Fuente de Internet	<1 %
42	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1 %
43	vadebarcos.net Fuente de Internet	<1 %
44	www.firp.ula.ve Fuente de Internet	<1 %
45	www.lcc.uma.es Fuente de Internet	<1 %
46	Coronel Rubio Lenin, Cruz Acevedo Andrés Catarino. "Interacción entre los componentes del concreto hidráulico", TESIUNAM, 1986 Publicación	<1 %
47	José Manuel Gandía Romero. "Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón"	<1 %

armado", Universitat Politecnica de Valencia,
2014

Publicación

48

Mónica Chillarón Pérez. "Análisis y desarrollo de algoritmos de altas prestaciones para reconstrucción de imagen médica TAC 3D basados en la reducción de dosis.",
Universitat Politecnica de Valencia, 2021

Publicación

<1 %

49

core.ac.uk

Fuente de Internet

<1 %

50

documents.mx

Fuente de Internet

<1 %

51

ebuah.uah.es

Fuente de Internet

<1 %

52

mail.imcyc.com

Fuente de Internet

<1 %

53

repositorio.urp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

54

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

55

www.ptolomeo.unam.mx:8080

Fuente de Internet

<1 %

56

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1 %

57

www.scielo.org.co

Fuente de Internet

<1 %

58

Gaspar Hernandez Silvano. "Control de
calidad en estructuras de concreto",
TESIUNAM, 1994

Publicación

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 7 words

Excluir bibliografía

Activo