



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

MÉTODOS EMPLEADOS EN LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCRETO LANZADO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
FRANCISCO HERNÁNDEZ DÍAZ

TUTOR PRINCIPAL
M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., ENERO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas
Secretario: Dr. Carlos Máximo Aire Untiveros
1^{er.} Vocal: M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo
2^{do.} Vocal: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes
3^{er.} Vocal: M.I. José Francisco Suárez Fino

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

AGRADECIMIENTOS

A Dios: Porque las oportunidades y los retos que me has puesto a lo largo de estos años me han hecho mejor persona, tanto en el ámbito personal como en el profesional, y tengo la certeza que los que vienen tendrán el mismo efecto; gracias Señor.

A mis padres: Justina Díaz y Francisco Hernández, por dedicar gran parte de su vida en mi formación humana y en mi educación profesional; mamá, gracias por estar a mi lado siempre; papá, gracias por enseñarme el valor del trabajo y a nunca rendirme; gracias a ambos por sus consejos, por su amor incondicional, por brindarme su apoyo y confianza totales para poder ser lo que ahora soy.

A mi hermana: Elizabeth, porque el hecho de que te identifiques conmigo y sea tu referente a seguir me motiva a ser mejor día con día, por tu paciencia y comprensión, porque cuando requiero de tu ayuda estas ahí.

A mi compañera: Laura García, porque eres en parte culpable de que yo haya decidido ser ingeniero civil, porque a pesar de las adversidades seguimos juntos, por tantos momentos compartidos, por tu apoyo incondicional.

A mi tutor y director de tesis: M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, por confiar en mí y darme la oportunidad de trabajar con usted y compartir una pequeña parte del extenso conocimiento que posee; por su apoyo, dedicación y paciencia durante la realización de mi servicio social y principalmente, en la realización de este estudio.

A mis amigos y colegas del Instituto de Ingeniería: porque sin su apoyo, la realización de este trabajo no hubiera sido posible, por los buenos momentos que he vivido con ustedes durante mi estancia en el Instituto.

A mis amigos de la licenciatura y del Posgrado: porque de ustedes aprendí cosas nuevas, por los momentos que compartimos en los salones de clase y fuera de ellos.

A mi alma mater: Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme formar parte de tu comunidad, por la formación tanto humana como profesional que recibí de tu parte, desde el bachillerato hasta la maestría, y por la cual siempre te estaré en deuda.

Al CONACYT: por el apoyo económico brindado durante la realización de mis estudios de maestría y permitirme formar parte de su comunidad.

De todo corazón, muchas gracias.

Francisco Hernández Díaz

Enero de 2017

RESUMEN

El concreto lanzado es una técnica versátil de colocar concreto, donde la mezcla se proyecta neumáticamente a gran velocidad contra una cierta superficie, la cual puede estar en posición vertical, horizontal o sobrecabeza. Este procedimiento de colocación de concreto, al igual que cualquier procedimiento constructivo, requiere de una atención cuidadosa de todos los aspectos que intervienen en él, por ello, es necesario establecer un procedimiento de control de calidad que asegure su correcto desempeño una vez colocado en sitio para que cumpla con la vida útil para la que se ha proyectado.

En el presente trabajo se describe de manera breve algunos aspectos generales del concreto lanzado, los factores que afectan su calidad en sitio y algunos ensayos que pueden conformar el procedimiento de control de calidad en obra y en laboratorio. También, se presentan los resultados obtenidos de un programa experimental desarrollado por el autor de esta tesis en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual consistió en el diseño, realización y caracterización de 8 mezclas de concreto lanzado por vía húmeda.

Los materiales utilizados en la fabricación de las mezclas de concreto fueron: cemento portland puzolánico (CPP), agregado grueso de origen calizo y agregado fino de origen andesítico en relación 25/75 que cumple con la granulometría No 2 del ACI 506R-05, 2010 (TMA igual a 12 mm), aditivo reductor de agua de alto rango, aditivo inclusor de aire para obtener contenidos de aire cercanos a 5.5% y ceniza volante como sustituto parcial de cemento en peso (10%). Se emplearon consumos de cemento de 400 y 500 kg/m³, con relaciones a/c de 0.39 y 0.49 y revenimientos entre 4 y 7.5 cm.

Se evaluó el comportamiento de las mezclas en estado fresco mediante los ensayos de revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire. En estado endurecido, se determinó: número de rebote (ensaye con esclerómetro), velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a compresión simple, módulo de elasticidad, relación de Poisson y resistencia a tensión por compresión diametral. También se realizaron ensayos rápidos de penetración de iones cloruro (ERPC), ensayos de absorción en agua hirviendo (AAH) y volumen de vacíos permeables (VVP), ensayos de absorción capilar y ensayos de contracción por secado.

Por último, se muestran algunas relaciones entre los parámetros antes enlistados a fin de generar curvas de calibración que permitan estimar la resistencia a compresión simple en función de ensayos no destructivos. También, se relacionan los valores de AAH con los del ensaye ERPC para verificar la relación que éstos tienen, ya que son los parámetros relacionados con la durabilidad del concreto lanzado e investigaciones recientes (Bolduc L.-S., et. al., 2010; Power, 2015) muestran que existe poca correlación entre ellos. Una alternativa consiste en estimar la durabilidad del concreto lanzado mediante el estudio de sus propiedades de transporte para modelar el ingreso de iones en el concreto en ambientes agresivos.

PALABRAS CLAVE: concreto lanzado, control de calidad de concreto lanzado, durabilidad, absorción en agua hirviendo, ensaye rápido de penetración de iones cloruro, propiedades de transporte, difusión iónica.

ÍNDICE

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES	2
1. ESTADO DEL ARTE	3
1.1 ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO LANZADO	3
1.1.1 Historia del concreto lanzado.....	3
1.1.2 Definición y usos.....	3
1.1.3 Procesos de colocación del concreto lanzado.....	4
1.1.4 Control de calidad del concreto lanzado.....	6
1.1.5 Propiedades del concreto lanzado	11
1.1.6 Criterio de durabilidad del concreto lanzado.....	12
1.1.7 Propiedades de transporte de fluidos en el concreto lanzado	14
2. DISEÑOS DE MEZCLAS	16
2.1 MATERIALES	16
2.1.1 Cemento	16
2.1.2 Agregados.....	17
2.1.3 Agua.....	18
2.1.4 Aditivos.....	18
2.1.5 Ceniza volante	19
2.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	19
2.3 ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS	21
2.4 FABRICACIÓN Y CURADO DE LOS ESPECÍMENES	22
3. ENSAYES DE LABORATORIO	24
3.1 ENSAYES EN ESTADO FRESCO	24
3.1.1 Revenimiento	24
3.1.2 Peso volumétrico y contenido de aire.....	25
3.2 ENSAYES EN ESTADO ENDURECIDO	26
3.2.1 Ensayes no destructivos: esclerómetro y velocidad de pulso ultrasónico.....	26
3.2.2 Resistencia a compresión simple	29
3.2.3 Módulo de elasticidad y relación de Poisson	30
3.2.4 Resistencia a tensión por compresión diametral.....	31
3.2.5 Ensaye rápido de penetración de iones cloruro.....	32
3.2.6 Absorción en agua hirviendo y volumen de vacíos permeables	33

3.2.7 Absorción capilar	34
3.2.8 Contracción por secado.....	36
4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS	38
4.1 CONCRETO EN ESTADO FRESCO	38
4.2 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO	39
4.2.1 Ensayes no destructivos: esclerómetro y velocidad de pulso ultrasónico	39
4.2.2 Resistencia a compresión simple	42
4.2.3 Módulo de elasticidad, deformación unitaria máxima y relación de Poisson	46
4.2.4 Resistencia a tensión por compresión diametral.....	50
4.2.5 Ensaye rápido de penetración de iones cloruro.....	51
4.2.6 Absorción en agua hirviendo y volumen de vacíos permeables	53
4.2.7 Absorción capilar	57
4.2.8 Contracción por secado.....	61
4.3 EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AIRE Y CENIZA VOLANTE A LA MEZCLA	63
5. RELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS	64
5.1 NÚMERO DE REBOTE Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE.....	64
5.2 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN	69
5.3 NÚMERO DE REBOTE Y VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.....	73
5.4 RELACIÓN ENTRE ABSORCIÓN EN AGUA HIRVIENDO Y VOLUMEN DE VACÍOS PERMEABLES	78
5.5 RELACIÓN ENTRE ABSORCIÓN EN AGUA HIRVIENDO Y EL ENSAYE RÁPIDO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	79
5.6 RELACIÓN ENTRE VOLUMEN DE VACÍOS PERMEABLES Y EL ENSAYE RÁPIDO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	81
CONCLUSIONES	84
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	87
REFERENCIAS	88

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

El concreto lanzado es un método de colocación de concreto que, por su naturaleza, requiere de una atención cuidadosa de todos los aspectos que intervienen, desde el diseño hasta la construcción. Por lo tanto, es necesario establecer un procedimiento de control de calidad que asegure su correcto desempeño una vez colocado en sitio para que cumpla con la vida útil para la que se ha proyectado.

El valor de absorción en agua hirviendo (AAH) que tenga el concreto lanzado es frecuentemente utilizado como criterio de durabilidad, al igual que el ensaye rápido de penetración de iones cloruro (ERPC). Sin embargo, investigaciones recientes (Bolduc L.-S, et. al., 2010; Power, 2015) demuestran la poca correlación que existe entre estos ensayos. Entonces ¿funcionan realmente los ensayos de AAH y ERPC como criterios de durabilidad del concreto lanzado? Por otra parte ¿tiene alguna influencia el uso de adiciones minerales como ceniza volante y humo de silice en la determinación de la AAH del concreto lanzado?

Con base en las preguntas antes planteadas, los objetivos de este trabajo son:

- Elaborar mezclas con las características del concreto lanzado y caracterizarlas a partir de especímenes fabricados en laboratorio.
- Generar valores de AAH y de permeabilidad al ion cloruro de mezclas de concreto lanzado hechas en laboratorio, para verificar la correlación que existe entre ambos.
- Generar resultados que ayuden a verificar los resultados de investigaciones previas y que a su vez puedan ser utilizados en investigaciones futuras.
- Verificar la influencia del aire incluido y de la ceniza volante en la determinación de la AAH y en el ERPC.

Las metas de este trabajo son:

- Profundizar en la tecnología del concreto lanzado, ya que es un material que requiere de una mayor y continua investigación, además de que su uso esta siendo más frecuente.
- Incentivar la investigación en concreto lanzado, principalmente en la determinación de su durabilidad, tema que hoy en día ha incrementado su importancia.

JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES

Cuando hablamos o escuchamos el término concreto lanzado, simplemente nos estamos refiriendo a una técnica de colocación de concreto, la cual, si bien tiene ciertas diferencias con respecto a las del concreto convencional, no deja de ser concreto, pues está hecha con los mismos materiales: cemento, agregados, agua y aditivos; de ahí surge la importancia de comprender los fundamentos básicos de la tecnología del concreto que intervienen en el diseño y colocación de este tipo de mezclas.

Uno de los objetivos indirectos de este trabajo es realizar una recopilación de los aspectos más importantes que deben ser tomados en cuenta para la correcta aplicación de esta técnica, tales como los usos que se le pueden dar al concreto lanzado, consideraciones de diseño y procedimientos de control de calidad.

Los aspectos antes mencionados fueron tomados en cuenta para desarrollar un programa experimental que comprende el diseño y realización de mezclas de concreto lanzado por vía húmeda, así como su caracterización, a fin de evaluar si estas mezclas cumplen con las características de una mezcla de concreto lanzado al salir de la boquilla.

Por otra parte, en el procedimiento de control de calidad se ven involucrados algunos aspectos relacionados con la durabilidad del concreto lanzado, tema que hoy en día es de suma importancia en el diseño de cualquier estructura, sea de concreto lanzado o convencional. Entiéndase por durabilidad como la capacidad que tiene la estructura de concreto para soportar las condiciones ambientales y de servicio para las que ha sido diseñada sin deterioro y durante el periodo o vida útil para el que ha sido proyectada.

El cumplimiento de un valor mínimo de absorción en agua hirviendo (AAH) en conjunto con un valor bajo de penetración de iones cloruro (ensaye rápido de penetración de iones cloruro, ERPC) son los principales parámetros con los que es relacionada la durabilidad del concreto lanzado; sin embargo, investigaciones recientes (Bolduc L.-S, et. al., 2010; Power, 2015) muestran que existe poca correlación entre estos parámetros. De aquí que uno de los objetivos específicos de este trabajo sea generar valores de AAH y de permeabilidad al ion cloruro para verificar la relación que estos tienen; los ensayos están incluidos dentro del programa experimental para la caracterización de las mezclas de concreto lanzado antes mencionadas.

Conocer si los ensayos mencionados son apropiados o no para describir la durabilidad del concreto lanzado nos dará la pauta para seguir utilizándolos con este objetivo y eventualmente considerar la posibilidad de incluirlos en las Normas Técnicas Complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, tal como y como está ocurriendo en la nueva versión. En caso contrario, habrá que buscar alternativas que permitan alcanzar dicho objetivo.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO LANZADO

1.1.1 Historia del concreto lanzado

Los orígenes del concreto lanzado se remontan a inicios del siglo XX, en Estados Unidos de América. Su primer antecedente se le atribuye a Carl Ethan Akeley, un taxidermista del Museo Americano de Historia Natural; su necesidad de reproducir modelos de animales prehistóricos lo llevó a desarrollar un método que consistió en elaborar una mezcla seca de cemento y arena que recibió el nombre de Gunitite. Este método fue patentado en 1911 por la Cement Gun y al año siguiente fue registrado como marca.

En 1914, George Rice llevó a cabo lo que se considera la primera aplicación de concreto lanzado subterránea en la Mina Experimental Brucetown (Reading, 1966). Al año siguiente, en 1915, la técnica del Gunitite comenzó a utilizarse en la construcción y reparación de edificios, puentes, depósitos, presas y túneles de drenaje. Pocos años después, el Gunitite llegó al Reino Unido, creándose la compañía UK Cement Gun y hacia 1922 el Gunitite ya era un proceso que abarcó el nivel global (Yoggy, 2005).

En la década de los años 30, la American Railway Engineering Association introdujo el término genérico Shotcrete para describir el proceso del Gunitite y, en 1951, el Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés) adoptó el término para describir el proceso por vía seca (ACI 506R-05, 2010).

Durante la década de 1950 se introdujeron pistolas para su utilización por el método de vía seca, añadiendo así el uso de agregado grueso en la mezcla (ACI 506R-05, 2010). También durante esta década se desarrollaron cerca de 5000 máquinas para la ejecución de proyectos en más de 120 países (Yoggy, 2005) y se diseñaron equipos para la colocación por vía húmeda con pistola rotativa.

Con la invención del proceso por vía húmeda, durante las décadas de 1970 y 1980 se realizaron mejoras a los equipos y materiales para su uso en el proceso mencionado. Estas mejoras permitieron bombear concretos con bajo revenimiento a grandes distancias en volúmenes mayores.

1.1.2 Definición y usos

El ACI 506R-05, 2010, define al concreto lanzado como “un mortero o concreto lanzado neumáticamente a una gran velocidad sobre una superficie”. La utilización de concreto lanzado como proceso constructivo

resulta ser atractiva en algunos tipos de trabajos en la construcción, principalmente por su rapidez de ejecución, flexibilidad y versatilidad (Höfler & Schlumpf, 2004). Algunos de estos trabajos son:

- Construcción de albercas, cisternas, tanques de agua, canales, alcantarillado.
- Reparación, rehabilitación y refuerzo de elementos estructurales.
- Aplicaciones de concreto refractario para chimeneas y hornos.
- Revestimientos y recubrimientos en mampostería, tierra, roca.
- Estabilización de taludes y muros de contención.
- Soporte y revestimiento de túneles y minas.

El concreto lanzado posee una alta calidad, alta trabajabilidad y alta flexibilidad, además de que tiene la capacidad de adaptarse a geometrías de túneles complejas, razones por las que su uso en este tipo de trabajos ha ganado popularidad a nivel internacional (Gall, et.al., 2010). Además, ofrece resistencias a edades tempranas altas y resistencia a la tensión, densidades máximas, buena impermeabilidad y buena adherencia.

1.1.3 Procesos de colocación del concreto lanzado (ACI 506R-05, 2010)

El concreto lanzado se puede clasificar de dos formas; la primera de ellas toma en cuenta el tamaño del agregado utilizado en la mezcla, clasificándolo en fino (granulometría No. 1, TMA igual 3/8") y grueso (granulometría No 2, TMA igual a 1/2"). La segunda forma de clasificación considera el proceso utilizado para su colocación, clasificando al concreto en concreto lanzado por vía seca y en concreto lanzado por vía húmeda. La elección del método dependerá de una serie de factores que son: economía, disponibilidad del material y equipo, acceso a la obra, entre otros.

El proceso de *concreto lanzado por vía seca* consiste en mezclar los materiales en seco y conducirlos neumáticamente por una manguera de lanzado, añadiendo el agua al final de la línea mediante una boquilla que se opera de forma manual. Existen algunos aditivos acelerantes en polvo que se pueden integrar a la mezcla seca. En general, este proceso de colocación consta de cinco pasos:

1. Se mezclan completamente todos los ingredientes, excepto el agua;
2. Se coloca la mezcla cementante-agregado dentro de un alimentador mecánico especial o cañón llamado equipo de impulsión.
3. Se introduce la mezcla en la manguera de impulsión mediante un dispositivo de control como una rueda alimentadora, rotor, o recipiente alimentador. Algunos equipos usan solamente aire a presión para impulsar el material dentro de las mangueras;
4. El material es impulsado con aire a presión a través de la manguera hasta la boquilla, la cual tiene internamente un anillo a través del cual se introduce el agua a presión, para que se mezcle completamente con los otros ingredientes; y
5. El material es lanzado a alta velocidad a través de la boquilla hasta la superficie a ser recubierta.

En la figura 1.1 se muestra un esquema general del proceso de colocación de concreto lanzado por vía seca.

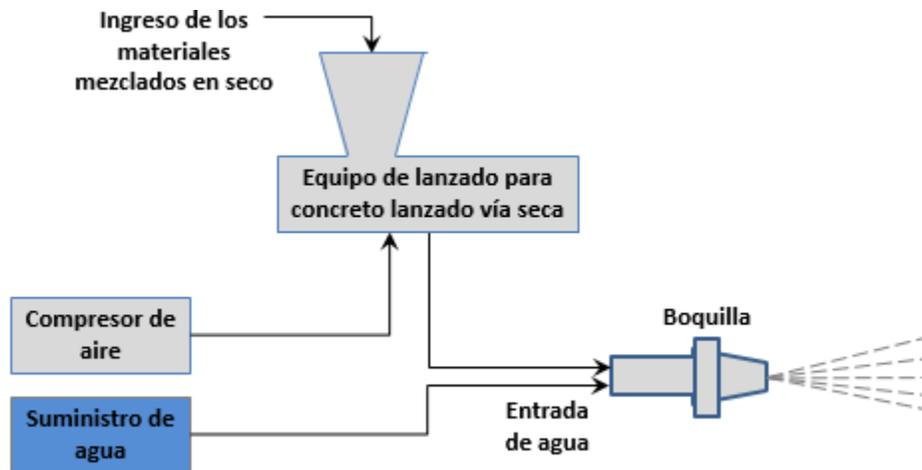


Figura 1.1 Esquema general del proceso de colocación de concreto lanzado por vía seca

El proceso de *concreto lanzado por vía húmeda* consiste en mezclar todos los ingredientes incluyendo el agua, para posteriormente ser bombeado a través de la manguera y ser lanzado con la velocidad suficiente haciendo uso de un flujo de aire en la boquilla. En este tipo de proceso, es común que el aditivo acelerante sea añadido a la mezcla en la boquilla. Los pasos a seguir para la colocación del concreto lanzado con este proceso son:

1. Todos los ingredientes incluyendo el agua de mezclado, se mezclan completamente;
2. Se introduce el mortero o el concreto dentro la cámara del equipo de impulsión;
3. La mezcla se regula dentro de la manguera de impulsión y se mueve mediante desplazamientos positivos o se conduce mediante aire comprimido hasta la boquilla;
4. Se inyecta aire comprimido en la boquilla para incrementar la velocidad de salida y mejorar el procedimiento de lanzado; y
5. El mortero o concreto se lanza a alta velocidad a través de la boquilla sobre la superficie a ser recubierta.

En la figura 1.2 se muestra un esquema general del proceso de colocación de concreto lanzado por vía húmeda.

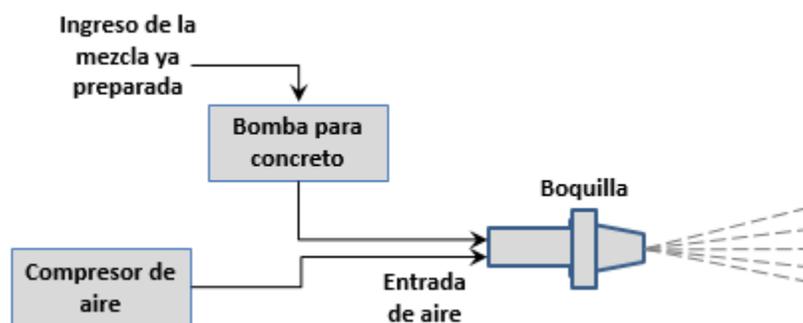


Figura 1.2 Esquema general del proceso de colocación de concreto lanzado por vía húmeda

Cualquiera de los procesos puede producir concreto lanzado adecuado para los requisitos de las construcciones normales. Diferencias en la inversión y costo de mantenimiento del equipo, características de operación del equipo, material disponible adecuado y características de colocación, puede hacer que un método u otro sea más atractivo para una aplicación particular. La tabla 1.1 presenta una comparación entre ambos procesos de colocación.

Tabla 1.1 Comparación entre concreto lanzado por vía seca y por vía húmeda (ACI 506 R-05, 2010)

Proceso de mezcla seca	Proceso de mezcla húmeda
<ol style="list-style-type: none"> 1. Control instantáneo del agua de mezclado y de la consistencia de la mezcla en la boquilla para adaptarse a las condiciones variables del sitio. 2. Mejor adecuación para la colocación de mezclas que contienen agregado ligero o material refractario. 3. Posibilidad de ser transportado a distancias más largas. 4. Las mangueras para conducirlo se pueden mover con mayor facilidad. 5. Menor volumen para un tamaño de manguera dado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. El agua de mezclado se controla en el equipo de mezclado y puede ser medida con precisión. 2. Mayor confianza de que el agua de mezclado se mezcla completamente con los otros ingredientes. 3. Menor cantidad de polvo y menor pérdida de material cementante durante el lanzado. 4. Tiene menor rebote y menor desperdicio. 5. Mayor volumen para un tamaño de manguera dado.

1.1.4 Control de calidad del concreto lanzado

El concreto lanzado es un método único de colocación de concreto que requiere de una atención cuidadosa de los detalles, desde el diseño hasta la construcción. Por tanto, es importante que se establezcan los procedimientos de control de calidad para asegurar que el producto final funcione como se diseñó y tenga una esperanza de vida útil satisfactoria.

Entre los factores que determinan la calidad del concreto lanzado están el diseño de la mezcla, los materiales, el equipo de aplicación, los operadores de los equipos, las técnicas de aplicación, procedimientos de ensaye y monitoreo constante de cada fase de colocación del concreto lanzado. Además, a quien se le encomiende esta actividad deberá tener conocimiento y experiencia en la aplicación del concreto lanzado y un criterio amplio para adaptar las especificaciones a las condiciones específicas de cada obra.

Un aspecto importante del aseguramiento de la calidad del concreto lanzado es la realización de ensayos físicos antes, durante y después de su colocación. De acuerdo con ACI 506R-05, 2010, se pueden realizar ensayos a compresión en núcleos de concreto lanzado una vez al día o cada 40 m³. El muestreo y ensaye puede variar, de acuerdo con la complejidad y tamaño del proyecto.

Para el aseguramiento de la calidad del concreto lanzado se puede realizar una serie de ensayos divididos en dos grupos: ensayos de control de calidad en obra y ensayos de control de calidad en laboratorio. En el

control de calidad en obra, los ensayos no destructivos son útiles en la determinación de la uniformidad y calidad del concreto lanzado en sitio; sin embargo, estos resultados no pueden proporcionar valores confiables de la resistencia a compresión y mucho menos pueden sustituirlos. En el control de calidad en laboratorio, es necesaria la extracción de núcleos de concreto lanzado a partir de paneles de prueba o directamente en sitio, para evaluar el comportamiento mecánico y aspectos relacionados con la durabilidad del concreto lanzado.

a) Control de calidad del concreto lanzado en obra

El ACI CP-60 y el ACI 506.2R establecen un sistema de clasificación de núcleos para evaluar el recubrimiento correcto del acero de refuerzo cuando éste se utiliza en concreto lanzado (ACI 506R-05, 2010). Este sistema de clasificación solo sirve para evaluar al operador de la boquilla y no se utiliza para evaluar a la estructura de concreto lanzado.

Por otra parte, existen ensayos no destructivos que determinan la dureza superficial del concreto en sitio; mientras que otros se encargan de detectar defectos internos del concreto, como delaminaciones y huecos.

El martillo de Schmidt o esclerómetro (ASTM C 805, 2014), es un aparato que mide la dureza superficial del concreto y verifica su uniformidad mediante el principio del rebote. No debe considerarse como un sustituto del ensayo de resistencia a compresión de núcleos, aunque si funciona en la localización de zonas discrepantes dentro de la estructura. Los resultados de este ensayo dependen de la textura de la superficie, condiciones de humedad, espesor y edad del concreto.

El ensayo de adherencia al sustrato (ACI 506.4R) proporciona un valor de resistencia a tensión entre capas de concreto lanzado o entre el concreto lanzado y el sustrato. El ensayo se realiza mediante la extracción de núcleos de 50 mm de diámetro a los cuales se les une un disco de acero con resina epóxica. Una fuerza de tensión se aplica al disco a través de una varilla de carga. La carga a la que ocurre la falla, dividida entre el área del núcleo se le conoce como la resistencia a la adherencia.

El método de velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C 597, 2009) consiste en introducir un pulso de energía de vibración dentro de un miembro mediante un transductor transmisor. El pulso se propaga a través del miembro y es recibido por otro transductor situado justo enfrente del transmisor. Se mide el tiempo que tarda el pulso en viajar de un transductor a otro. La distancia entre transductores dividida entre el tiempo que tarda en viajar el pulso representa la velocidad de pulso a través del miembro. La presencia de defectos internos en el concreto (consolidación inadecuada, huecos o microgrietas) aumentan el tiempo en que viaja el pulso, resultando en una velocidad de pulso aparentemente baja.

Otros ensayos que pueden ser utilizados en el control de calidad en obra son (ACI 506.4R, 2004):

- El ensayo de resistencia a la penetración (ASTM C 803) que mide la dureza de la superficie del concreto

- El ensaye de extracción (ASTM C 900) que consiste en medir la fuerza de extracción necesaria para extraer un injerto de acero que se cuela en el concreto lanzado
- Métodos de eco, cuyo principio es similar al del método de velocidad de pulso ultrasónico.
- Termografía infrarroja, que mide la uniformidad del concreto con base en la diferencia de conductividad térmica entre el concreto y el defecto que éste pueda tener.
- Radiografías, utilizadas para determinar la condición interna de una porción de un miembro estructural.

En el caso del concreto lanzado por vía húmeda, se pueden realizar ensayos como el de revenimiento, (ASTM C 143), contenido de aire (ASTM C 173, ASTM C 231) y determinación de su peso volumétrico. El tiempo de fraguado (ASTM C 1117) se puede realizar tanto para mezclas lanzadas por vía seca como por vía húmeda.

b) Control de calidad del concreto lanzado en laboratorio

Los ensayos en laboratorio para evaluar la calidad del concreto lanzado se pueden dividir en dos grupos. El primero de ellos se encarga de determinar el comportamiento mecánico del concreto, mientras que el segundo involucra la determinación de aspectos relacionados con su durabilidad. Los especímenes frecuentemente utilizados para la realización de estos ensayos son núcleos de concreto obtenidos de paneles o artesas, de acuerdo con la norma ASTM C 1604, o bien, directamente de la estructura.

En el primer grupo se encuentran los ensayos para la determinación de la resistencia a compresión (ASTM C 39), determinación del módulo de elasticidad (ASTM C 469) y resistencia a tensión (ASTM C 496). Los especímenes para efectuar estos tres ensayos serán núcleos de al menos 75 mm de diámetro, los cuales deberán tener una relación longitud/diámetro entre 1 y 2 ($1 < l/d < 2$). Si l/d es mayor que 2, el espécimen deberá recortarse. Los núcleos que tengan una relación l/d menor a 2 pero mayor que 1, se podrán ensayar y el resultado será afectado por un algún factor de corrección apropiado de los que se muestran en la tabla 1.2, pudiendo usarse la interpolación para determinar factores de corrección no mostrados en dicha tabla. Estos factores no aplican en la determinación de la resistencia a tensión.

Tabla 1.2 Factores de corrección de resistencia a compresión determinada en núcleos (ASTM C 1604)

Relación longitud/diámetro (L/D)	Factor de corrección de resistencia
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

En el segundo grupo se ubican los ensayos de densidad, absorción en agua hirviendo (AAH) y volumen de vacíos permeables (VVP) en el concreto (ASTM C 642), el ERPC (ASTM C 1202) y ensayos de permeabilidad al agua.

Para la determinación de la densidad, AAH y VVP se recomienda utilizar como especímenes núcleos con diámetro mínimo de 100 mm y estimarlas como el promedio de al menos 3 ensayos. Esta recomendación se hace debido a que los resultados son muy sensibles al tamaño de la muestra (ACI 506R-05, 2010). En el caso del ERPC, los especímenes de prueba son pastillas de 100 mm de diámetro y espesor de 50 mm. Estos se pueden obtener a partir de núcleos del diámetro antes señalado.

El ensaye de permeabilidad al agua en laboratorio se realiza sometiendo un espécimen cilíndrico, o núcleo de concreto, bajo presión hidrostática, la cual se aplica en la parte superior del espécimen. Se mide el tiempo que tarda un volumen específico de agua en atravesar la muestra como flujo uniaxial. Los cálculos de permeabilidad se hacen con la ecuación de Darcy.

c) Rebote y exceso de rocío

Existen dos subproductos del proceso de lanzado que no son deseados por su efecto negativo sobre la calidad del concreto en sitio que son el rebote y el exceso de rocío.

El rebote se puede definir como partículas de agregado y pasta de cemento que rebotan fuera de la superficie durante la aplicación del concreto lanzado debido al choque con la superficie receptora, acero de refuerzo o con otras partículas de agregado. La cantidad de rebote depende de factores como son:

- Proceso de colocación del concreto lanzado.
- Dirección del lanzado (horizontal, vertical o sobre cabeza).
- Diseño de la mezcla de concreto lanzado (contenido de cemento, contenido de agua, granulometría y tamaño máximo de agregado).

El exceso de rocío consiste en las partículas de material ligero que se depositan y se adhieren en superficies u objetos lejanos a la superficie de aplicación del concreto lanzado, dejando un espesor no consolidado de concreto de baja calidad sobre ellas (ACI 506R-05, 2010). Algunos de estas superficies u objetos pueden ser mallas de alambre electrosoldada, acero de refuerzo, cimbras, entre otros.

El exceso de rocío y el material de rebote deben ser eliminados de la superficie de concreto antes de continuar con su colocación. Ambos efectos pueden llegar a cubrir huecos y bolsas de arena que reducen la unión entre capas de concreto o en el caso del exceso de rocío, reduce la adherencia con el acero de refuerzo, si este se utiliza. El operador de la boquilla también es capaz de controlar o minimizar estos efectos, verificando la presión de aire, velocidad de impacto y el ángulo de la boquilla a la hora de realizar el lanzado. Una representación del rebote y del exceso de rocío se muestra en la figura 1.3.

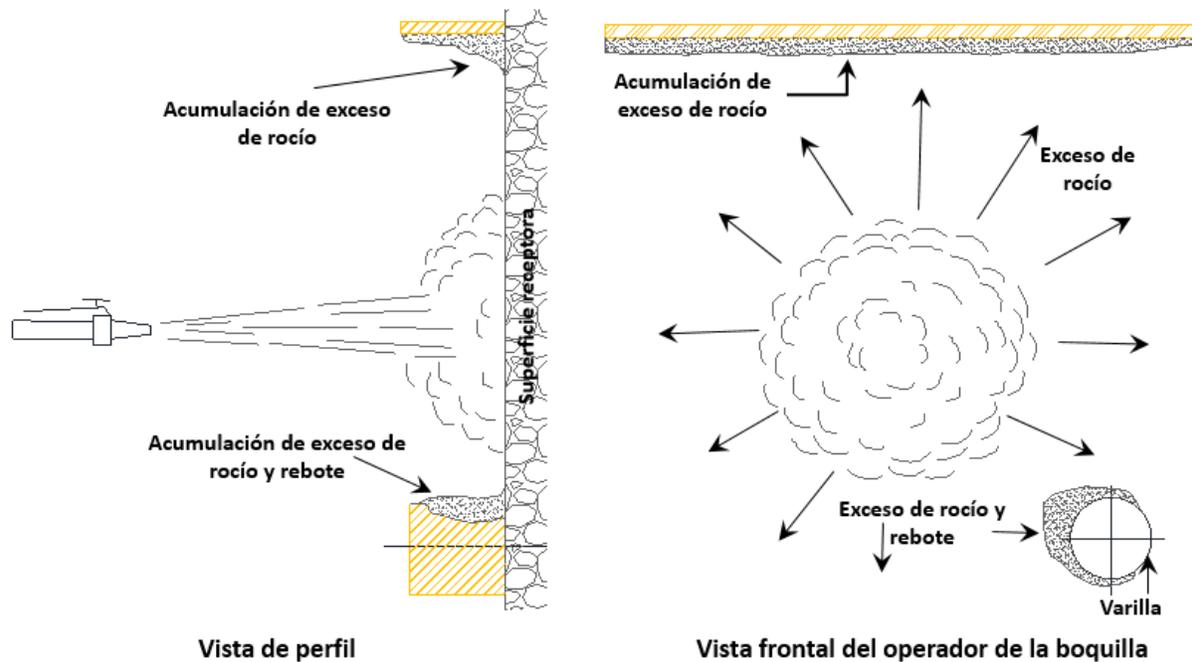


Figura 1.3 Representación del rebote y el exceso de rocío (ACI 506R-05, 2010)

d) Aplicación manual y robótica de concreto lanzado.

Al igual que el rebote y el exceso de rocío, la experiencia que tenga el operador de la boquilla (o lanzador) en la colocación del concreto lanzado es un parámetro importante y determinante en la calidad del concreto lanzado en sitio, independientemente de que la aplicación del concreto lanzado sea manual o robótica.

El operador de la boquilla es la persona clave en una operación de concreto lanzado, ya que es el responsable de la colocación del concreto y, por lo tanto, de llevarlo a los estándares de calidad especificados. Durante el lanzamiento, el operador de la boquilla se encarga de controlar el contenido de agua (en el caso de las mezclas de concreto lanzado por vía seca) y se asegura de que la presión de aire sea uniforme para proporcionar una alta velocidad de impacto y por ende, una buena compactación. El operador de la boquilla debe estar certificado por el programa ACI CP-60 o alguno similar. Además, es deseable que el operador haya completado al menos una operación similar como operador de boquilla en un proyecto similar (ACI 506R-05, 2010).

Una aplicación manual de concreto lanzado con la técnica adecuada de colocación genera un concreto de alta calidad; las técnicas de aplicación de concreto lanzado pueden consultarse a detalle en el documento ACI 506R-05, 2010 y en Bracamontes, 2015. Por otra parte, la aplicación robótica de concreto lanzado está siendo utilizada con mayor frecuencia debido a que ofrece algunas ventajas sobre la aplicación manual, como son:

- *Mejorías en la seguridad de los trabajadores:* la aplicación se realiza a control remoto desde una zona donde el trabajador no está expuesto a riesgos de trabajo (por ejemplo, zonas inestables).

- *Incrementos en la producción:* la aplicación robótica permite incrementar el diámetro de la manguera de lanzado hasta 4" (en aplicación manual el diámetro máximo es de 2"), permitiendo colocar un mayor volumen de concreto en un tiempo menor y se elimina la fatiga del operador.

Derivado del último punto del listado anterior, al eliminar la fatiga del operador, la calidad del concreto es más uniforme durante todo el proceso de lanzado, pero no necesariamente la incrementan, por lo tanto, es importante contar con personal certificado para la ejecución de este tipo de trabajo.

1.1.5 Propiedades del concreto lanzado

Como regla general, la composición de la mezcla afectará las propiedades del concreto lanzado endurecido de la misma manera como lo hace en el concreto convencional. Sin embargo, los efectos asociados con el proceso de lanzado, como la compactación, el rebote y la orientación de las fibras (en caso de incluirlas), puede afectar las propiedades del concreto lanzado endurecido.

La relación agua/material cementante (a/c) es clave para las mezclas de concreto lanzado por vía húmeda, como lo es la relación cemento/agregado para las mezclas de concreto lanzado por vía seca. La reducción de la relación a/c mejora la mayor parte de las propiedades del concreto lanzado, incluyendo resistencia, permeabilidad y durabilidad. Algunas propiedades del concreto lanzado y sus características comunes se muestran en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Propiedades del concreto lanzado y sus características, fuente: ACI 506R-05, 2010

Propiedad del concreto lanzado	Características comunes
Resistencia a compresión	Variación de 400 – 500 kg/cm ² en mezclas lanzadas por vía seca Variación de 300 – 500 kg/cm ² en mezclas lanzadas por vía húmeda
Resistencia a flexión	Utilización de malla de alambre soldado (proporciona ductilidad) o fibras de acero o sintéticas (proporciona tenacidad y capacidad para soportar cargas después del agrietamiento, controlan el agrietamiento y mejoran la resistencia al impacto)
Resistencia a la adherencia	Resistencia a tensión superior a 10 kg/cm ² , siendo la mínima de 7 kg/cm ² . La preparación de la superficie receptora influye en esta propiedad.
Contracción por secado	Tiene relación con el agrietamiento potencial y la reducción de la adherencia. Variación usual entre el 0.06 y 0.10% a 3 meses
Absorción y volumen de vacíos permeables	Indicación de la calidad del concreto lanzado. Volumen de vacíos permeables entre 14 y 17%. Absorción en Agua Hirviendo entre 6 y 9%
Densidad	Variación entre 2200 y 2400 kg/m ³ (concreto de alta calidad)
Módulo de elasticidad	Variación entre 170000 y 400000 kg/cm ² , aproximadamente.

1.1.6 Criterio de durabilidad del concreto lanzado

El cumplimiento de un valor mínimo de resistencia a compresión y un valor máximo permisible de AAH son las especificaciones que debe cumplir un concreto lanzado. Por otra parte, se puede hacer uso del ERPC, que en conjunto con la AAH, son los principales parámetros con los que se relaciona la durabilidad del concreto lanzado.

El método ASTM C 642 “*Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*”, describe el procedimiento de ensaye para la determinación de la AAH y el VVP del concreto en estado endurecido. El rango de valores sugerido para la AAH está basado en los índices de calidad de Morgan (tabla 1.4). Morgan propone estos índices con base en el análisis de miles de muestras de concreto lanzado por vía seca y sus correspondientes valores de AAH y volumen de vacíos permeables. El ACI 506-05, 2010, señala que valores típicos de AAH varían entre 6 y 9%. Estos valores también se consideran en la Propuesta del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2014.

Tabla 1.4 Índices de calidad de Morgan, 1987

Calidad del concreto lanzado	VVP, %	AAH, %
Excelente	< 14	<6
Bueno	14 – 17	6 – 8
Razonable	17 – 19	8 – 9
Marginal	> 19	>9

El ERPC ASTM C 1202 “*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration*” consiste en determinar la conductancia eléctrica del concreto, con la finalidad de proporcionar una evaluación rápida y general sobre la capacidad que tiene el concreto para resistir la penetración de iones cloruro, que son los responsables de la iniciación de la corrosión del acero de refuerzo. Con base en la carga total que atraviesa la muestra de concreto (en Coulombs), el método ASTM C 1202 establece un sistema de clasificación que mide la penetrabilidad del ion cloruro, el cual se muestra en la tabla 1.5.

Tabla 1.5 Clasificación de la penetrabilidad del ion cloruro, ASTM C 1202

Carga que pasa, Coulombs	Penetrabilidad del ion cloruro
>4000	Alto
2000 – 4000	Moderado
1000 – 2000	Bajo
100 – 1000	Muy bajo
<100	Despreciable

La AAH y el ERPC dan una idea general sobre la calidad del concreto y de la durabilidad que este tiene. Sin embargo, investigaciones recientes (Bolduc L.-S. et.al., 2010; Power, 2015) demuestran que existe poca

correlación entre estos ensayos. Esto es porque la AAH está afectada por el tamaño de los poros accesibles en la superficie del concreto, mientras que el ERPC depende de la conectividad entre los poros y menormente de su tamaño.

Para explicar lo antes mencionado, observemos la gráfica de la figura 1.4. Esta gráfica es la misma que Bolduc L.-S. et. al., 2010 utiliza en sus investigaciones para determinar la relación entre la AAH y el ERPC. En ella se han identificado 4 zonas principales. La zona 1 indica un concreto que tiene una reducida AAH y una penetrabilidad muy baja, por lo cual sería aceptado; la zona 4 representa todo lo contrario a la zona 1, es decir, se tiene un concreto con una calidad marginal de acuerdo con su AAH y una penetrabilidad a los cloruros alta.

El problema se presenta en las zonas 2 y 3. La zona 2 corresponde a un concreto que tiene muy baja penetrabilidad pero una AAH alta, motivo por el cual este concreto podría ser rechazado. La zona 3 representa el caso contrario, donde el concreto tiene una baja AAH, por lo cual sería aceptado, a pesar de tener una alta penetrabilidad a los cloruros.

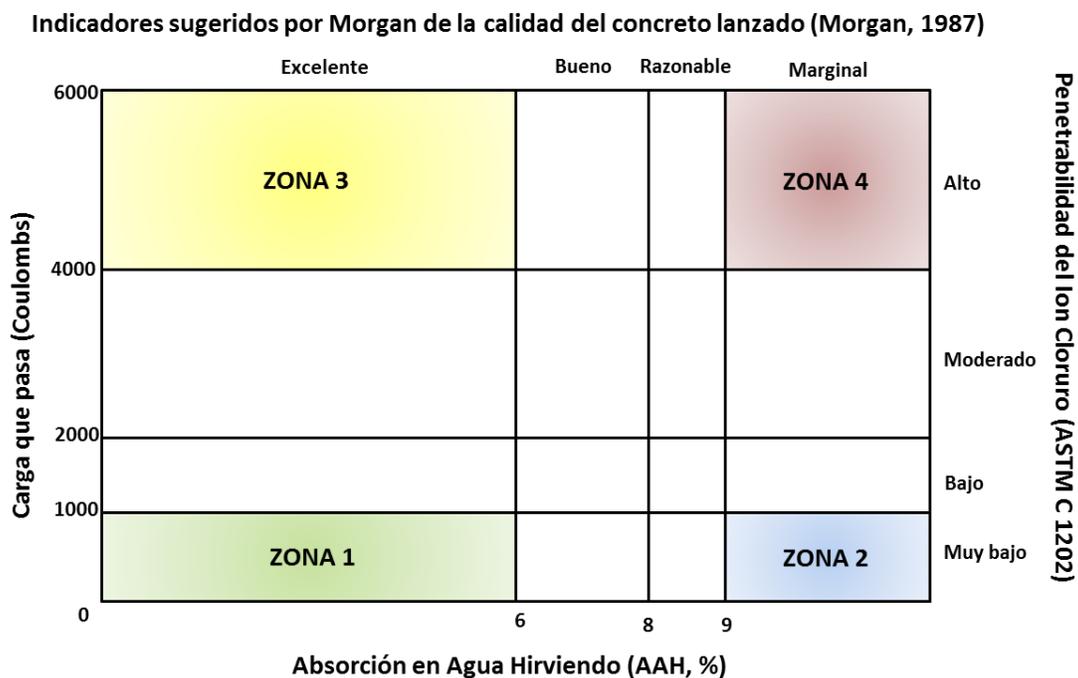


Figura 1.4 Correlación entre los ensayos de AAH y ERPC (Bolduc L.-S. et.al, 2010)

La conclusión de esta investigación (Bolduc L.-S. et. al., 2010) es que el ensaye de AAH no es un parámetro confiable para estimar la durabilidad del concreto lanzado, debido a la poca correlación que tiene con el ERPC. Esta idea esta apoyada por investigaciones previas (de Schutter et.al, 2004), que tambien muestran la poca correlación entre ambos parámetros.

Como una alternativa, Bolduc L.-S. et. al., 2010 propone estimar la durabilidad del concreto lanzado haciendo uso de sus propiedades de transporte, principalmente en la difusión de iones cloruro en el interior del concreto. En el siguiente tema se describen brevemente las propiedades de transporte de fluidos en el concreto, haciendo una descripción más a detalle sobre la difusión iónica.

1.1.7 Propiedades de transporte de fluidos en el concreto lanzado

El movimiento de fluidos dentro de la red de poros del concreto está controlado por diversos mecanismos conocidos como mecanismos o propiedades de transporte, los cuales pueden dividirse en tres categorías:

- Absorción capilar: consiste en la succión de agua, como resultado de la tensión superficial ejercida en los poros capilares.
- Permeabilidad: consiste en el movimiento de un fluido, como resultado de un gradiente de presión.
- Difusión iónica: consiste en el movimiento de iones, como resultado de un gradiente de concentración.

Estos mecanismos pueden presentarse de manera simultánea. La absorción capilar es el primer mecanismo que se presenta, mientras que la permeabilidad y la difusión iónica se presentan a una velocidad mucho menor. De estos tres mecanismos, la difusión iónica es la que tendrá un mayor efecto a largo plazo. En la figura 1.5 se muestran algunos ejemplos de estos mecanismos de transporte.

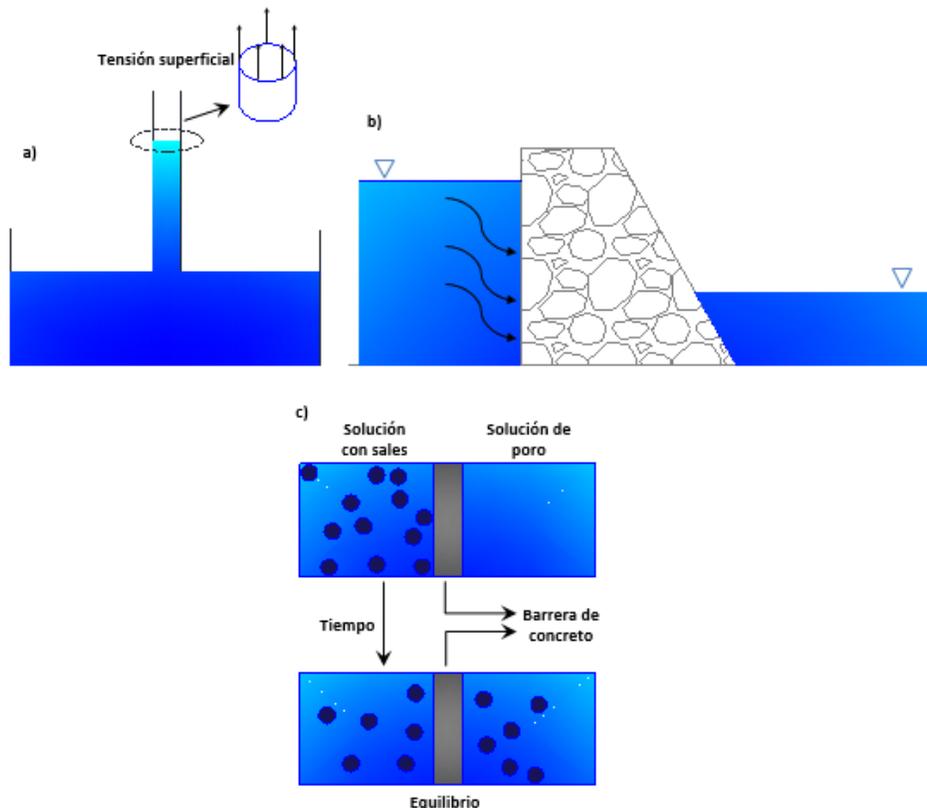


Figura 1.5 Propiedades de transporte de fluidos en el concreto: a) absorción capilar, b) permeabilidad, c) difusión iónica, fuente: elaboración propia a partir de Power, 2015.

a) Difusión iónica

Cuando el concreto se sumerge o se expone a agua con una cierta concentración de sales, la concentración de cloruros en la solución de poro es mas baja que la de la solución con sales. Como debe haber un equilibrio, los iones de la solución con sal migrarán de dicha solución hacia la solución de poro del concreto, hasta que se alcance el equilibrio. El fenómeno de la difusión se puede modelar mediante la segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Donde:

C.- concentración de ion cloruro a una profundidad, en un cierto tiempo

Dc.- Coeficiente de difusión del material

El coeficiente de difusión de cloruro es un indicador de la capacidad de cualquier tipo de concreto para resistir la penetración de cloruros y es usado para predecir la vida útil de estructuras de concreto reforzado (Lizarazo-Marriaga et.al., 2009). Un coeficiente de difusión bajo (y por lo tanto, una rapidez de difusión baja) se logra cuando la porosidad del concreto es baja.

Diversos modelos de difusión de cloruros (Ossorio et.al., 2014; Stanish et.al., 2003; Mangat et.al., 1994) se han desarrollado para concreto convencional y posiblemente pueden ser aplicables a concreto lanzado. Sin embargo, la aplicación de estos modelos es laboriosa y consume tiempo (Jolin et. al., 2010), además, en concreto lanzado es una nueva técnica que se encuentra en estudio.

2. DISEÑOS DE MEZCLAS

En este capítulo se describen las características de los materiales utilizados en esta investigación, las cuales fueron tomadas en cuenta para el diseño y elaboración de las mezclas de concreto lanzado, así como sus características, las cuales buscan representar las características de una mezcla de concreto lanzado por vía húmeda ya colocada. Así mismo, se describe el proceso de elaboración de las mezclas y la fabricación y curado de los especímenes.

2.1 MATERIALES

2.1.1 Cemento

De acuerdo con la norma ASTM C 595, el cemento utilizado en este estudio se puede clasificar como un cemento hidráulico compuesto tipo IP; es decir, se trata de un cemento portland puzolánico (CPP). Su análisis químico se realizó en laboratorio con la colaboración del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) y sus resultados se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Análisis químico del cemento CPP

SiO ₂ – Sílice	%	15.5
Al ₂ O ₃ – Alúmina	%	4.1
Fe ₂ O ₃ - Óxido de hierro	%	2.6
CaO - Cal combinada	%	53.2
CaO - Cal libre	%	1.5
MgO – Magnesio	%	0.8
SO ₃ - Trióxido de azufre	%	2.9
Residuo insoluble	%	12.54
Pérdida por calcinación	%	6.1
Suma	%	99.24
Álcalis	Na ₂ O - Oxido de sodio	% 0.19
	K ₂ O - Oxido de potasio	% 0.51
	Total de álcalis (Na ₂ O + 0.658K ₂ O)	% 0.53
Compuestos potenciales		
Silicato tricálcico, C ₃ S		65.35
Silicato dicálcico, C ₂ S		-4.84
Aluminato tricálcico, C ₃ A		6.47
Ferroaluminato tetracálcico, C ₄ AF		7.91

Aunque los contenidos de óxido de magnesio (MgO), trióxido de azufre (SO₃), y residuo insoluble están dentro de los límites establecidos por la norma, la pérdida por ignición fue ligeramente mayor (6.1%) al límite establecido por la norma (5.0%), esto nos hace pensar que el almacenaje del cemento no fue el adecuado.

2.1.2 Agregados

Para la elaboración de las mezclas de concreto lanzado se utilizó un agregado grueso de origen calizo y un agregado fino de origen andesítico. Las propiedades físicas de cada uno de ellos se muestran en las tablas 2.2 y 2.3, respectivamente, así como las normas que se utilizaron para su determinación en laboratorio.

Tabla 2.2 Propiedades físicas del agregado grueso

Propiedad	Norma	Resultado
Tamaño máximo, mm (pulg.)	ASTM C 125	12 (1/2")
Peso específico, seco	ASTM C 127	2.65
Peso específico, SSS	ASTM C 127	2.67
Absorción, %	ASTM C 127	0.85
Peso volumétrico seco (suelto), kg/m ³	ASTM C 29	1431
Peso volumétrico seco (compactado), kg/m ³	ASTM C 29	1596

Tabla 2.3 Propiedades físicas del agregado fino

Propiedad	Norma	Resultado
Módulo de finura	ASTM C 125	3.03
Peso específico, seco	ASTM C 128	2.18
Peso específico, SSS	ASTM C 128	2.35
Absorción, %	ASTM C 128	7.87
Pasa la malla 200, %	ASTM C 117	18.58
Peso volumétrico seco (suelto), kg/m ³	ASTM C 29	1502
Peso volumétrico seco (compactado), kg/m ³	ASTM C 29	1646

A diferencia de las mezclas de concreto convencional, en las mezclas de concreto lanzado el contenido de arena es mayor que el contenido de grava y se recomienda que el tamaño máximo de agregado grueso no sea mayor a 12 mm (1/2"). Esto se debe a que partículas de mayor tamaño tienden a crear bloqueos en la manguera y en la boquilla, además de que su rebote es muy peligroso (Bracamontes, 2015). Es por esto que la relación grava/arena que se empleó en este estudio es de 25/75 en volumen absoluto, proporción que también cumple con los límites granulométricos especificados por el comité ACI 506R-05, 2010 para la graduación no. 2 (TMA igual a 12 mm). En la figura 2.1 se muestra la granulometría combinada de los agregados utilizados en este estudio.

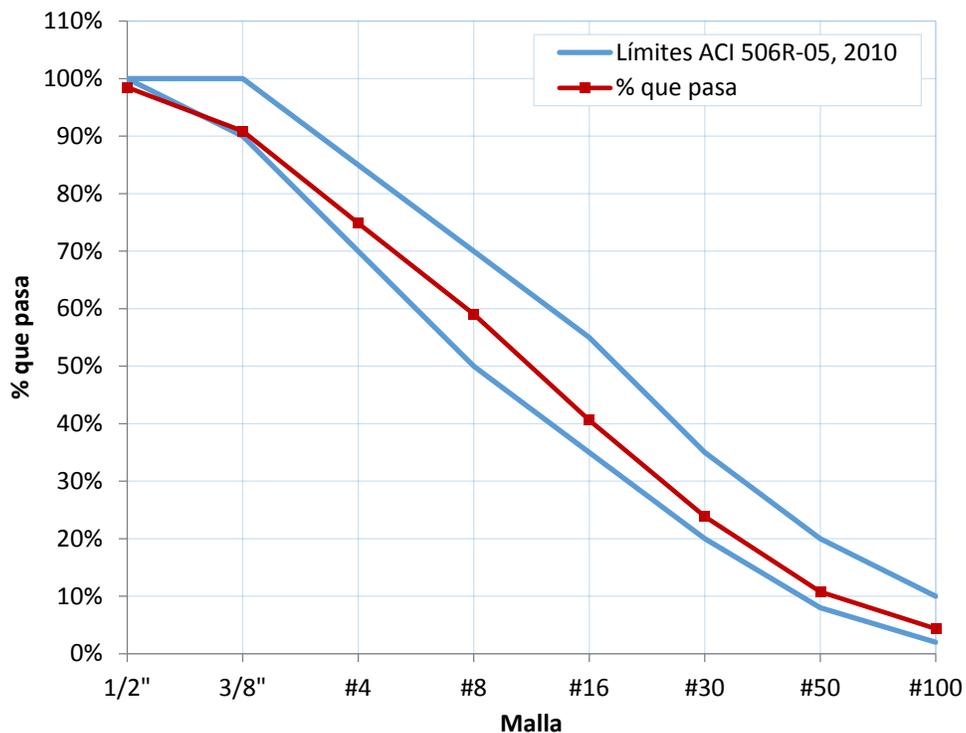


Figura 2.1 Granulometría combinada de los agregados utilizados (relación grava/arena de 25/75).

2.1.3 Agua

En general, el agua deber ser limpia y libre de sustancias que puedan ser perjudiciales al concreto o en su caso, al acero de refuerzo, siendo el agua potable la que debe usarse. El agua de mezclado que se empleó para la elaboración de las mezclas proviene del sistema de agua de Ciudad Universitaria. El agua de mezclado debe cumplir los requisitos de la Norma Mexicana NMX-C-122-ONNCCE.

2.1.4 Aditivos

El uso de aditivos en concreto lanzado permite mejorar ciertas propiedades en aplicaciones especiales y para ciertas condiciones de aplicación. Los aditivos acelerantes e inclusores de aire son de uso frecuente en mezclas de concreto lanzado, así como los reductores de agua, salvo que estos últimos solo son eficientes en las mezclas lanzadas por vía húmeda.

De acuerdo con la norma ASTM C 1141, los aditivos utilizados son: un aditivo reductor de agua de alto rango (PLASTOL PRECAST PLUS) grado 7, clase A, que cumple con los requisitos de la norma ASTM C 494 tipo A y F, y un aditivo inclusor de aire (AEA-92) grado 8, clase A, que cumple con los requisitos de la norma ASTM C 260.

2.1.5 Ceniza volante

La ceniza volante se define como el residuo finamente dividido o molido que resulta de la combustión del carbón mineral y que es transportado en el flujo gaseoso (ASTM C 618). En otras palabras, la ceniza consiste en el subproducto de la combustión del carbón en las centrales carboeléctricas para la producción de energía.

La ceniza volante utilizada proviene de la Carboeléctrica de CFE de Río Escondido, en el estado de Coahuila; está clasificada como ceniza clase F. Los ensayos químicos se hicieron en laboratorio con la colaboración del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) de acuerdo con las normas ASTM C 618, ASTM C 311 y ASTM C 114; los resultados de estos ensayos se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Resultados de los ensayos químicos realizados a la ceniza volante

Componente	Clase, %			Resultados obtenidos
	N	F	C	
Dióxido de silicio (SiO ₂) + óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) + óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), min %	70.0	70.0	50.0	92.2
Trióxido de azufre (SO ₃), max %	4.0	5.0	5.0	0.2
Contenido de humedad, max %	3.0	3.0	3.0	0.5
Pérdida por calcinación, max %	10.0	6.0	6.0	2.9
Álcalis disponibles (Na ₂ O), max %	1.5	1.5	1.5	3.7

2.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Una mezcla de concreto lanzado se diseña y elabora exactamente con los mismos materiales que una mezcla de concreto convencional; es decir, cemento, agregados (grava y arena), agua, aditivos y en algunos casos, sustituciones parciales de cemento por ceniza volante o humo de sílice y/o fibras. En este estudio se diseñaron mezclas de concreto con las características de una mezcla de concreto lanzado por vía húmeda.

La relación grava/arena típica de una mezcla de concreto lanzado es 30/70 (Bracamontes, 2015); adicional a esto, se recomienda que se evalúe la distribución de tamaños al combinar ambos agregados para que cumplan con las granulometrías recomendadas por el comité ACI 506R-05, 2010. Tomando en cuenta estos aspectos, y después de realizar el análisis granulométrico por separado y combinado de los agregados, se determinó que la relación grava/arena a emplear en este estudio fuera 25/75. El tamaño máximo del agregado es de 12 mm y la relación grava/arena antes señalada cumple con la granulometría No 2 especificada en el documento ACI 506R-05, 2010 (ver figura 2.1).

Se debe tomar en cuenta que el hecho que una mezcla tenga una mayor cantidad de agregados finos que agregados gruesos implica que se tiene una mayor área específica, la cual es necesario esté cubierta en su totalidad con material cementante para obtener una buena adherencia entre los agregados y la pasta de

cemento. Por esta razón, los consumos de cemento por metro cúbico en una mezcla de concreto lanzado suelen ser mayores con respecto a las de concreto convencional, desde 350 hasta 500 kg/m³ (Bracamontes, 2015) En este estudio, se escogieron dos consumos de cemento: 400 y 500 kg/m³ de mezcla.

En cuanto al tipo de cemento, se decidió utilizar un cemento portland puzolanico (CPP), que es uno de los cementos que se encuentra en mayor disponibilidad en el mercado. Además, las características de este tipo de cemento no afectan los objetivos de este estudio.

Para tratar de representar las características de una mezcla de concreto lanzado con las condiciones que estas tienen al salir de la boquilla (o bien, ya colocadas) se buscaron, durante la realización de las mezclas preliminares, las cantidades de agua y aditivos con las cuales se obtuviera un revenimiento entre 4 y 7.5 cm con las cantidades de cemento antes señaladas, que es el intervalo aproximado de revenimiento que tiene la mezcla al salir de la boquilla. La cantidad de agua utilizada fue de 195 kg/m³ de mezcla y se mantuvo fija para todas las mezclas, obteniendo así dos relaciones agua/cemento (a/c): 0.39 y 0.49.

En cuanto a los aditivos, se utilizó un aditivo reductor de agua y un aditivo inclusor de aire. Las razones para utilizar aditivos inclusores de aire en mezclas de concreto lanzado por vía húmeda son dar mayor fluidez a la mezcla y reducir el rebote. Es común encontrar inclusiones de aire entre 6 y 10% (Bracamontes, 2015); posteriormente, parte de ese porcentaje se perderá por bombeo, por la entrada en contacto de la mezcla con el aire comprimido en la boquilla y con la compactación del concreto contra la superficie, de tal forma que la mezcla ya colocada queda con un porcentaje de aire incluido cercano a 5.5%. Durante la realización de las mezclas preliminares se buscó la cantidad de aditivo que proporciona un porcentaje de aire cercano y no mayor al antes mencionado.

Por otra parte, las adiciones minerales como un sustituto parcial de cemento suelen mejorar el desempeño de una mezcla de concreto en estado fresco y/o endurecido. Es por ello que se decidió realizar una sustitución parcial con ceniza volante de 10% en peso; se eligió este porcentaje debido a las características del cemento.

Con las consideraciones antes descritas, y una vez que se realizaron las mezclas preliminares correspondientes, se determinaron 8 diseños de mezcla cuyas dosificaciones se muestran en la tabla 2.5.

Las mezclas nombradas como M1 y M2 serán las mezclas testigo; a partir de ellas se agregó aditivo inclusor de aire (mezclas M3 y M4), 10% de ceniza volante como sustitución parcial de cemento (mezclas M5 y M6) y una combinación de inclusión de aire con el porcentaje de ceniza volante antes señalado (mezclas M7 y M8).

Tabla 2.5 Diseños de mezclas (kg/m³)

Mezcla	Relación a/c	Agua	Cemento	Ceniza volante	Grava caliza 1/2"	Arena andesita	Plastol precast plus (ml)*	AEA-92 (ml)**
M1	0.49	195	400	-	438	1156	1400	-
M2	0.39	195	500	-	416	1099	2250	-
M3	0.49	195	400	-	418	1103	1200	680
M4	0.39	195	500	-	396	1046	2000	850
M5	0.49	195	360	40	434	1146	1600	-
M6	0.39	195	450	50	411	1087	2500	-
M7	0.49	195	360	40	414	1093	1400	680
M8	0.39	195	450	50	391	1034	2250	850
* Plastol Precast plus.- Aditivo reductor de agua de alto rango								
** AEA-92.- Aditivo inclusor de aire								

2.3 ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS

Elaborar una mezcla de concreto consiste en mezclar todos los materiales que la conforman para obtener un material homogéneo. El mezclado de los materiales de cada una de las mezclas mostradas en la tabla 2.5 se realizó en 2 tandas de 87 litros, debido a la capacidad de la revolvedora utilizada. El procedimiento de mezclado descrito en pasos fue el siguiente:

1. Obtención del contenido de humedad de los agregados para realizar la corrección del diseño base por humedad y absorción de los agregados.
2. Dosificación de los materiales para fabricar 2 tandas de 87 litros.
3. Preparación de la revolvedora, esto es, humedecer la superficie interna del tambor y las aspas con agua suficiente.
4. Incorporación de agregado grueso, agregado fino y agua de absorción a la revolvedora ya preparada, mezclado durante un minuto.
5. Incorporación de cemento.
6. Adición del agua de mezclado restante y mezclado durante dos minutos
7. Reposo de la mezcla con la boca de la revolvedora tapada con una franela húmeda durante un minuto para evitar la pérdida de humedad.
8. Reanudación del mezclado e incorporación del aditivo reductor de agua de alto rango.

Para las mezclas M5, M6, M7 y M8, la incorporación de la ceniza volante se hizo al mismo tiempo que el cemento (paso 5). Para las mezclas con aire incluido (mezclas M3, M4, M7 y M8), el aditivo inclusor de aire se añadió en un paso adicional a los antes enlistados, mezclándolo durante un minuto y 30 segundos. En la figura 2.2 se muestra la forma en la que se realizaron las mezclas en este estudio.



Figura 2.2 Mezcla de concreto lanzado “M8”, con 10% de ceniza volante como sustituto de cemento e inclusión de aire de 4.9%.

2.4 FABRICACIÓN Y CURADO DE LOS ESPECÍMENES

La fabricación y curado de los especímenes obtenidos de cada una de las mezclas para la realización de los ensayos que las caracterizarán, se realizó conforme a la norma ASTM C 192. A su vez, los moldes deben cumplir con los requisitos que establece la norma ASTM C 470, relativa a la capacidad de absorción del material del que están fabricados los moldes y las tolerancias en sus dimensiones.

En general, se fabricaron 23 especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm para la realización de los ensayos de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson y resistencia a tensión diametral. También, se fabricaron 12 especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm para la realización de los ensayos de AAH y VVP, absorción capilar y ERPC. Por último, se fabricaron 4 barras prismáticas de 7.5 x 7.5 x 25 cm para el ensayo de contracción por secado.

Conviene señalar que, a excepción de los especímenes para el ensayo de contracción por secado, no todos los especímenes mencionados en el párrafo anterior fueron utilizados, algunos de ellos sirvieron como reserva ante cualquier problema que pudiera haberse presentado durante los ensayos. En la figura 2.3 se muestran los especímenes fabricados por cada mezcla.



Figura 2.3 Especímenes fabricados de la mezcla “M8”, recién moldeados

Los especímenes se fabricaron en tres capas, con vibración externa en cada una de ellas mediante una mesa vibradora, posteriormente se enrasaron y se dejaron en los moldes por un lapso de 24 horas. Pasado este tiempo, se desmoldaron y se llevaron a la cámara de curado, a una temperatura de 23 ± 2 °C (ASTM C 192).

3. ENSAYES DE LABORATORIO

El desempeño adecuado del concreto lanzado depende de las condiciones del sitio (por ejemplo, ambientes agresivos con concentraciones de cloruros o sulfatos) y de la forma en que éste haya sido colocado. Los especímenes para evaluar la calidad y las propiedades del concreto lanzado normalmente son núcleos de concreto lanzado extraídos a partir de artesas que se prepararán siguiendo el procedimiento establecido en los métodos ASTM C 1604 y ASTM C 1140.

En esta investigación, se elaboraron mezclas de concreto lanzado que buscan representar las características que éstas tienen al salir de la boquilla y ya colocadas. La manera en que fueron elaboradas las mezclas permitió la obtención de especímenes cilíndricos cuyas características y procedimiento de fabricación se describen en el capítulo anterior.

El siguiente paso es caracterizar estas mezclas, realizando los ensayos que en este capítulo se describen a los especímenes antes mencionados. Estos ensayos son los típicos que se pueden realizar para caracterizar una mezcla de concreto lanzado por vía húmeda y por ende, formar parte del procedimiento de control de calidad.

3.1 ENSAYES EN ESTADO FRESCO

Una de las características del concreto en estado fresco es la trabajabilidad de la mezcla, que se puede definir como la facilidad con la que es posible colocar, manejar, transportar y compactar el concreto en la obra. Los ensayos en estado fresco que son de uso frecuente en concreto convencional son aplicables a las mezclas de concreto lanzado por vía húmeda; estos son: el revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire.

3.1.1 Revenimiento

Este ensayo muestra la consistencia del concreto y es un parámetro que indica la facilidad de colocación, manejo y compactación de la mezcla. Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma ASTM C 143 haciendo uso del cono de Abrahams. A todas las mezclas involucradas en este estudio se les determinó el revenimiento antes y después de incorporar el (los) aditivo(s). El objetivo de realizar este ensayo fue verificar que las mezclas elaboradas tuvieran la consistencia o el revenimiento típico de una mezcla de concreto lanzado al salir de la boquilla (4 a 7.5 cm). En la figura 3.1 se muestra un ensayo de revenimiento realizado a la mezcla M2.



Figura 3.1 Ensayo de revenimiento realizado a una mezcla de concreto lanzado (mezcla M2).

3.1.2 Peso volumétrico y contenido de aire

El ensayo de peso volumétrico consiste en determinar el peso por metro cúbico de concreto y se realiza de acuerdo con la norma ASTM C 138.

Por otra parte, el ensayo de contenido de aire proporciona el porcentaje de contenido de aire en el concreto fresco con respecto al volumen del concreto. Existen tres formas de medir este contenido de aire: método gravimétrico, método volumétrico y método de presión. En este estudio, la medición se realizó haciendo uso del método de presión, el cual se basa en la medición del volumen de agua que penetra en el concreto al someterlo a un cambio de presión; este ensayo se realiza conforme a la norma ASTM C 231.

En la figura 3.2 se muestra el equipo empleado en la determinación del peso volumétrico y el contenido de aire de todas las mezclas en estudio.



Figura 3.2 Equipo empleado para determinar el peso volumétrico y el contenido de aire de todas las mezclas

3.2 ENSAYES EN ESTADO ENDURECIDO

Los ensayos que se realizan al concreto en estado endurecido tienen por objetivo conocer el comportamiento mecánico del concreto y algunas propiedades relacionadas con su durabilidad. Estas propiedades, de forma individual o combinada, pueden perjudicar el desempeño de las estructuras si no se alcanzan los parámetros establecidos en el diseño. Las edades a las que se realizaron los ensayos fueron 28 y 91 días, a excepción del ensaye de resistencia a compresión, que se realizó a las edades de 7, 28 y 91 días.

3.2.1 Ensayes no destructivos: esclerómetro y velocidad de pulso ultrasónico

La realización de ensayos no destructivos en cualquier tipo de concreto ayuda a obtener un diagnóstico rápido sobre el estado en que se encuentra una estructura. Esto permite localizar zonas en la estructura que son potenciales de presentar daños estructurales. Realizar ensayos con esclerómetro y con equipos para determinar la velocidad de pulso ultrasónico suelen ser útiles en este aspecto.

a) Esclerómetro

El ensaye con esclerómetro (o martillo de Schmidt) consiste en medir la dureza superficial del concreto mediante el principio de rebote de una masa elástica. El rebote medido por el aparato se correlaciona con una curva proporcionada por el fabricante del esclerómetro, con la cual se puede estimar la resistencia del concreto colocado. Se debe dejar en claro que este método no sustituye al de resistencia a compresión simple, pero es útil para verificar la uniformidad del concreto.

En esta investigación se determinó una curva de calibración similar a las que proporcionan los fabricantes de estos aparatos. Para la elaboración de esta curva, se determinó el número de rebote de cada mezcla mediante el ensaye de tres especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm; el rebote medido será posteriormente relacionado con su correspondiente resistencia a compresión simple.

La norma ASTM C 805 describe el procedimiento a seguir para la realización de ensayos con esclerómetro. En dicha norma se indica que se requiere de una masa de concreto con un espesor mayor a 10 cm para poder realizar el ensaye. Además, las superficies a ensayar deben ser planas y lisas y se debe tomar un mínimo de 10 lecturas; los puntos de aplicación deben estar separados 2.5 cm entre ellos y 5 cm de los bordes.

Tomando en cuenta las consideraciones que establece la norma, se acondicionaron las superficies de los extremos de los cilindros frotándolas con una copa abrasiva hasta dejar las superficies lisas; posteriormente, sobre estas caras se localizaron los puntos de aplicación del esclerómetro, como se muestra en la figura 3.3. Esta distribución de puntos cumple con los requisitos de separación que establece la norma para su aplicación, salvo que solo se tienen 5 puntos en una misma área; por ello, se decidió ensayar ambos extremos del cilindro, teniendo así un conjunto de 10 datos.

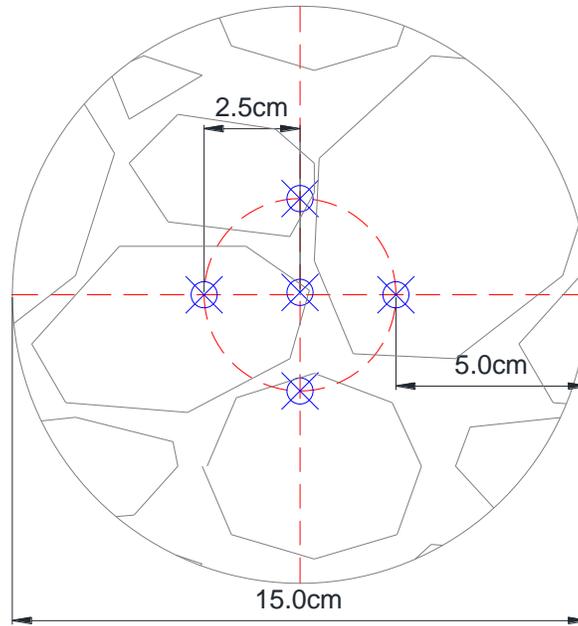


Figura 3.3 Distribución de puntos de aplicación del esclerómetro en la superficie de aplicación (extremos del cilindro).

Para una correcta realización del ensayo, los especímenes se sujetaron en un tornillo de banco y se nivelaron con un nivel de mano, colocando el embolo del esclerómetro en posición normal respecto a la superficie de ensayo, como se muestra en la figura 3.4.

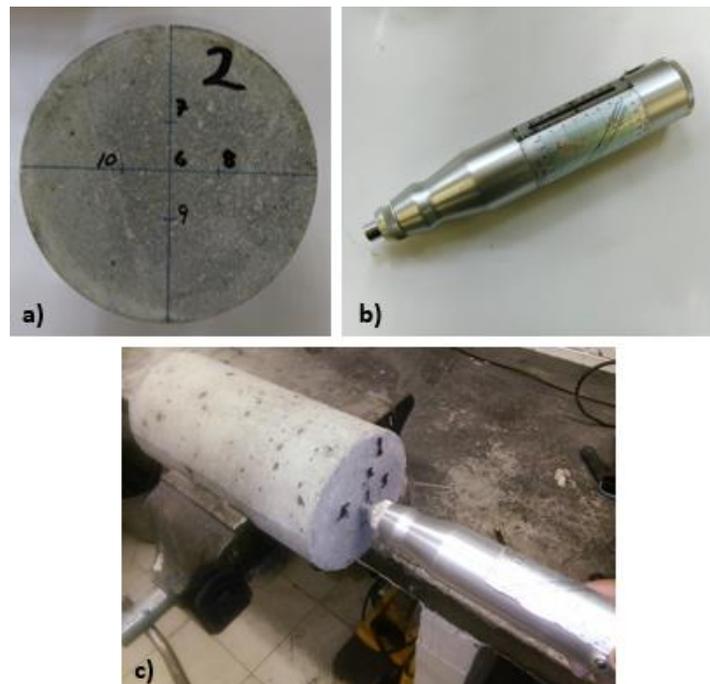


Figura 3.4 Ensayo con esclerómetro: acondicionamiento de la superficie de ensayo y trazado de los puntos de aplicación (a), esclerómetro utilizado en la investigación (b), sujeción del espécimen para su ensayo (c).

b) Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

El método ASTM C 597 describe el procedimiento a seguir para la realización del ensaye de VPU, cuyo objetivo es identificar defectos internos del concreto a través de la introducción de un pulso de energía de vibración dentro de un miembro de concreto mediante un transductor transmisor. En resumen, el método consiste en determinar el tiempo que tarda en viajar un pulso de un transductor emisor a un transductor receptor colocados a cierta distancia; con estos datos se calcula la velocidad de la onda.

En esta investigación se determinó la velocidad de pulso ultrasónico de cada mezcla mediante el ensaye de tres especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm. Al igual que con el número de rebote, esta velocidad será relacionada posteriormente con su correspondiente valor de resistencia a compresión, con la finalidad de generar una curva de calibración similar a la que se obtiene con el número de rebote y la resistencia a compresión.

Para la realización del ensaye de VPU se utilizaron los especímenes utilizados en el ensaye con el esclerómetro. Las superficies donde se apoyan los transductores deben estar lisas, por lo que el acondicionamiento realizado previamente funciona para este ensaye. El equipo que se utilizó para la determinación del tiempo de tránsito fue un equipo ultrasónico marca James Instruments, modelo C4902 y un par de transductores con frecuencia de 54 kHz (figura 3.5).



Figura 3.5 Equipo utilizado para la determinación de la VPU

Para la determinación del tiempo de tránsito, con el aparato ya calibrado con una barra de referencia, se colocaron los transductores en el centro de las superficies de los extremos de los cilindros, tratando de mantenerlos alineados en todo momento. Como agente de contacto se utilizó grasa entre los transductores y la superficie de ensaye, esto con la finalidad de asegurar una eficiente transferencia de energía entre el concreto y los transductores. La figura 3.6 muestra el procedimiento antes descrito.

La VPU se calcula como el cociente entre la distancia entre los transductores (que es la altura promedio del cilindro) y el tiempo que tarda en viajar el pulso registrado por el aparato.

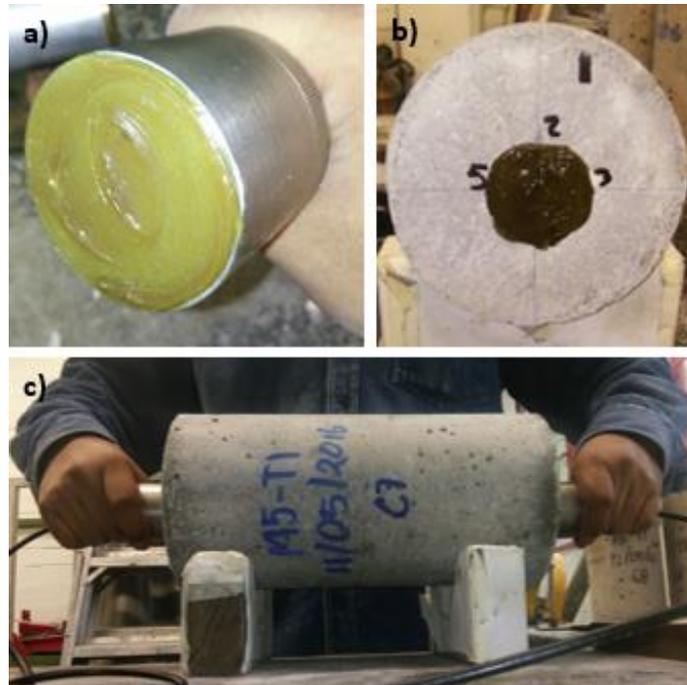


Figura 3.6 Ensaye para determinar la VPU del concreto: acondicionamiento de los transductores (a) y la superficie de ensaye (b) con grasa, forma de realización del ensaye sobre el espécimen (c).

3.2.2 Resistencia a compresión simple

Se define como la medida de la resistencia a compresión del concreto cuando se somete un espécimen de este material a una carga axial de compresión; está influenciada por la relación agua/cemento, la calidad de los agregados, una correcta compactación y el curado.

Para determinar la resistencia a compresión de las mezclas de este estudio se utilizó el procedimiento que establece la norma ASTM C 39, haciendo uso de los especímenes utilizados para la determinación del número de rebote y la VPU. Antes del ensaye, los especímenes fueron medidos y pesados, para después realizar un cabeceo con mortero de acuerdo con la norma ASTM C 617.

En este ensaye se utilizó una prensa universal modelo SATEC de 250 toneladas de capacidad para la aplicación de la carga sobre el espécimen previamente acondicionado. La velocidad de carga aplicada sobre el espécimen fue de 25 t/min, la cual fue aplicada hasta llevar el espécimen a la falla.

La figura 3.7 muestra la prensa universal utilizada en este estudio, un ejemplo de un espécimen listo para ser ensayado y la forma de falla de los especímenes.



Figura 3.7 De izquierda a derecha: Prensa universal modelo SATEC, espécimen listo para ser ensayado, falla del espécimen después del ensaye.

3.2.3 Módulo de elasticidad y relación de Poisson

Se le llama módulo de elasticidad del concreto a la pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en compresión cuyo valor está asociado a la resistencia a compresión. Por otra parte, la relación de Poisson se define como la relación entre la deformación transversal generada en el espécimen debido a la aplicación de una carga axial de compresión y la deformación longitudinal. El procedimiento utilizado para la obtención del módulo de elasticidad y la relación de Poisson fue el que establece la norma ASTM C 469.

En este ensaye se utilizaron 3 especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm, la prensa universal utilizada en el ensaye de resistencia a compresión y un compresómetro con transductores de desplazamiento tipo LVDT para el registro de las deformaciones longitudinales y transversales. La prensa universal utilizada en esta investigación esta acondicionada con un controlador por carga y desplazamiento, lo cual permite la adquisición de datos para efectuar los cálculos correspondientes. La velocidad de carga fue de 25 t/min y fue aplicada hasta llevar el espécimen a la falla. La figura 3.8 muestra los equipos utilizados en este ensaye.

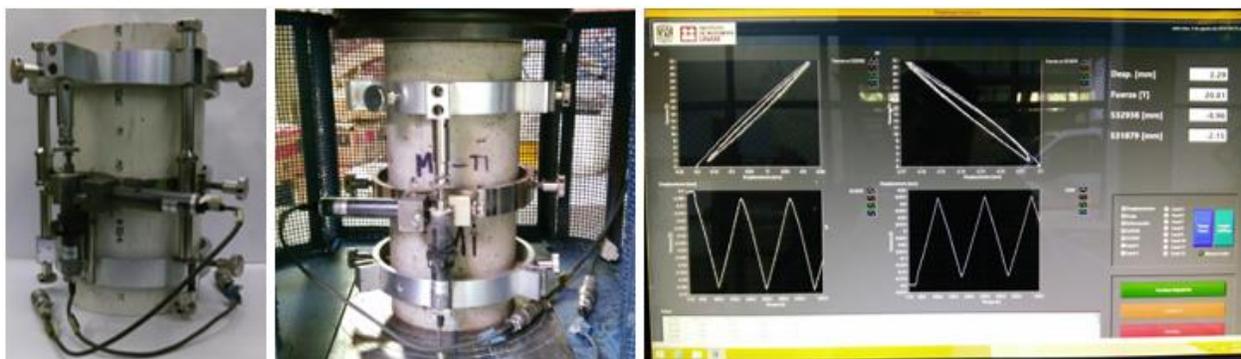


Figura 3.8 Equipos utilizados en el ensaye de módulo de elasticidad.

En general, el procedimiento de cálculo consiste en calcular los esfuerzos y deformaciones unitarias longitudinales y transversales para trazar la curva esfuerzo – deformación unitaria. El módulo de elasticidad se calculó con la pendiente de la recta que pasa por el 40% del esfuerzo máximo y la deformación unitaria correspondiente a 50 millonésimas. La relación de Poisson se calculó dividiendo la diferencia entre las deformaciones transversales correspondientes al 40% del esfuerzo máximo y a 50 millonésimas, respectivamente, entre la diferencia de las deformaciones unitarias longitudinales correspondientes a los puntos antes mencionados.

La figura 3.9 muestra un ejemplo de la curva esfuerzo – deformación unitaria utilizada para el cálculo del módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

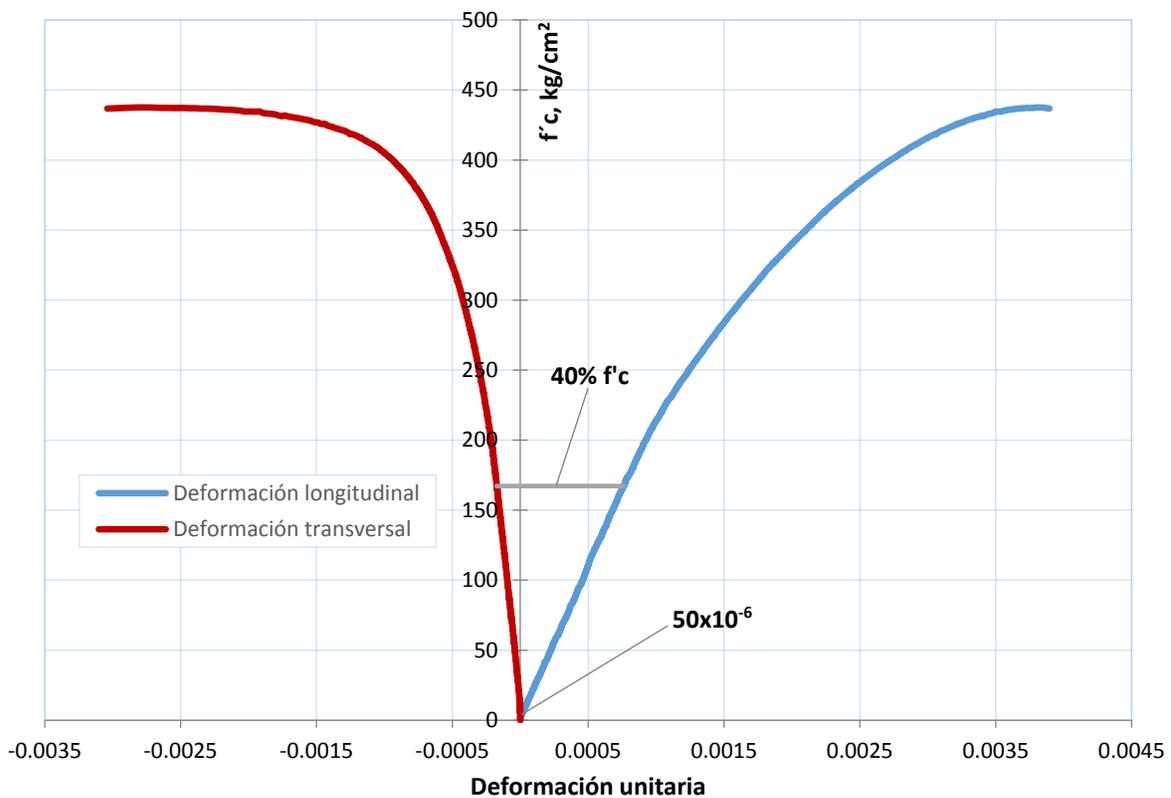


Figura 3.9 Curva esfuerzo – deformación unitaria de un espécimen fabricado con concreto lanzado con un consumo de cemento de 500 kg/m^3 .

3.2.4 Resistencia a tensión por compresión diametral

Este ensaye, también conocido como “prueba brasileña”, consiste en ensayar un espécimen cilíndrico de concreto sometiéndolo a la acción de dos fuerzas opuestas de compresión uniformemente repartidas a lo largo de su eje de simetría. Bajo esta carga de compresión diametral, en los extremos se generan esfuerzos de compresión, pero en el resto de la sección del cilindro (aproximadamente el 80 %) se producen esfuerzos de tensión uniformes. El ensaye se realiza de acuerdo con el método ASTM C 496.

Para determinar la resistencia a tensión por compresión diametral de las mezclas de este estudio, se utilizaron 3 especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm. Se utilizó la misma prensa universal utilizada en los ensayos de resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad y relación de Poisson. La velocidad de aplicación de carga fue de 7 t/min.

Entre las placas que transmiten la carga y la superficie del espécimen se colocan dos tiras de material compresible para evitar la concentración de esfuerzos de compresión que se pueden generar por la presencia de irregularidades a lo largo del eje del espécimen; esto promueve que el espécimen falle por efecto de esfuerzos de tensión y no por aplastamiento en las zonas de aplicación de la carga. El material compresible utilizado fue triplay de madera de 3 mm de espesor. La figura 3.10 muestra la configuración del ensaye y la forma de falla del espécimen en este ensaye.

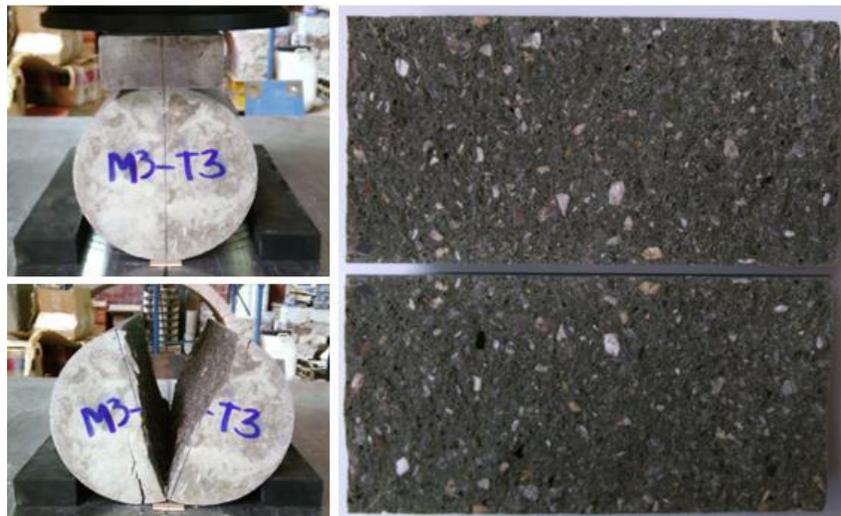


Figura 3.10 Configuración y forma de falla del espécimen en el ensaye de resistencia a tensión por compresión diametral. El espécimen que se muestra corresponde a la mezcla “M3”, con un consumo de cemento de 400 kg/m³ y aire incluido (4.9%).

3.2.5 Ensayo rápido de penetración de iones cloruro

El ensaye ERPC consiste en determinar la conductancia eléctrica del concreto, con la finalidad de proporcionar una medida rápida y general sobre la capacidad que tiene el concreto para resistir la penetración de iones cloruro. El ensaye se realiza de acuerdo con lo establecido en el método ASTM C 1202. Si bien el concreto no sufre daños considerables por la acción de iones cloruro, estos tienen influencia directa en la corrosión del acero de refuerzo.

Para la realización de este ensaye se utilizaron 2 especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm de los cuales se cortaron 3 especímenes de 5 cm de espesor cada uno, obteniendo un total de 6 especímenes. El acondicionamiento de estas muestras fue el descrito en la norma antes señalada. Posterior al acondicionamiento, las muestras se colocaron en las celdas de medición, con una solución de cloruro de sodio al 3% en masa (NaCl 3%) por un extremo y una solución de hidróxido de sodio 0.3 normal (NaOH

0.3N) en el otro extremo. La figura 3.11 muestra un ejemplo de las características de los especímenes utilizados en este ensaye.



Figura 3.11 Ejemplo de especímenes utilizados para el ERPC, se muestran los especímenes de la mezcla M8 (500 kg/m³, 10% de ceniza volante y 4.9% de aire incluido) para su ensaye a 91 días.

Las celdas montadas con el espécimen y las soluciones son conectadas a un equipo que mide y registra la cantidad de corriente en Coulombs que pasa a través del espécimen en un periodo de 6 horas y con una diferencia de potencial de 60V (figura 3.12).



Figura 3.12 Equipo utilizado para la medición y el registro de la penetración de iones cloruros durante un ensaye.

3.2.6 Absorción en agua hirviendo y volumen de vacíos permeables

El ensaye de absorción en agua hirviendo consiste en determinar el porcentaje de AAH y el VVP de una muestra de concreto, valores que suelen ser vistos como índices de la calidad y durabilidad del concreto lanzado. El método ASTM C 642 describe el procedimiento de ensaye para la determinación de estos parámetros.

En resumen, el procedimiento consiste en secar los especímenes en un horno a 110 ± 5 °C por periodos de 24 horas, asegurando mediante diferencia de masas que el espécimen está totalmente seco; posteriormente, el espécimen se sumerge en agua a 21 °C por un periodo no menor de 48 horas, hasta que la diferencia de dos valores sucesivos de masa de la muestra saturada superficialmente seca tomados cada 24 horas indique que el espécimen está totalmente saturado.

Una vez saturado, el espécimen se coloca en un recipiente con agua potable y se hierve durante 5 horas, luego se le deja enfriar hasta una temperatura entre 20 y 25 °C y se determina la masa saturada superficialmente seca después de ebullición. Por último, después de la ebullición, el espécimen se suspende en agua con un alambre y se determina su masa aparente sumergida en agua.

Los datos que se obtienen de este procedimiento y con los cuales se realiza el cálculo de la AAH y el VVP son:

- Masa seca al horno
- Masa saturada superficialmente seca después de la inmersión en agua
- Masa saturada superficialmente seca después de la ebullición
- Masa aparente sumergida en agua

Los especímenes utilizados para este ensaye fueron 6 especímenes de 5.5 cm de espesor cortados a partir de 2 cilindros de 10 x 20 cm. Estas dimensiones del espécimen cumplen con el volumen requerido por la norma para ser ensayado (volumen mínimo igual a 350 cm^3). Para el secado de los especímenes se utilizó el horno capaz de mantener la temperatura requerida, mientras que para la ebullición de los especímenes se utilizó un calentador de agua, ambos se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.13 Horno utilizado para el secado de los especímenes y calentador de agua utilizado para la ebullición.

3.2.7 Absorción capilar

El ensayo de absorción capilar consiste en determinar la velocidad de absorción (también llamada sortividad) de agua del concreto endurecido, mediante la medición del incremento de masa de un espécimen de concreto, resultado de la absorción de agua en función del tiempo. El ensayo se realiza de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C 1585.

Los especímenes de ensayo son especímenes de 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor, cuyo acondicionamiento consiste en almacenarlos en una cámara a una temperatura de 50 ± 2 °C y humedad relativa de 80 ± 3 % durante 3 días. Posteriormente, los especímenes se almacenan en recipientes sellables y se almacenan a una temperatura de 23 ± 2 °C por al menos 15 días. Al final de este periodo, los especímenes se sellan con una resina epóxica en su periferia y con una hoja de plástico sujeta con una liga en uno de los extremos. Los especímenes sellados se colocan en un recipiente sobre un soporte, con un tirante de agua entre 1 y 3 mm. Posteriormente, se registran los pesos del espécimen a los intervalos que se establecen en la norma.

En esta investigación se cortó un espécimen cilíndrico para obtener 3 especímenes con las características antes descritas. Para el acondicionamiento de la muestra se utilizó el procedimiento alterno que se indica en la norma, el cual consiste en colocar los especímenes en un desecador y llevarlos al horno a la temperatura antes señalada, controlando la humedad relativa con una solución saturada de bromuro de potasio (80.2g/100g de agua). La figura 3.14 muestra la configuración del dispositivo para la realización de este ensaye.



Figura 3.14 Configuración del dispositivo utilizado en el ensaye de absorción capilar

El procedimiento de cálculo consiste en calcular para cada espécimen la absorción (I) con los pesos registrados, que es el cambio de masa dividido entre el producto del área transversal del espécimen por la densidad del agua. Posteriormente se calculan las velocidades de absorción inicial y secundaria como las pendientes de la línea de mejor ajuste en un gráfico de absorción contra la raíz cuadrada del tiempo en segundos. Las velocidades de absorción inicial y secundaria de cada mezcla se calculan como el promedio de las velocidades determinadas de los especímenes cuyo coeficiente de correlación es mayor o igual a 0.98. Un ejemplo de cálculo se muestra en la figura 3.15.

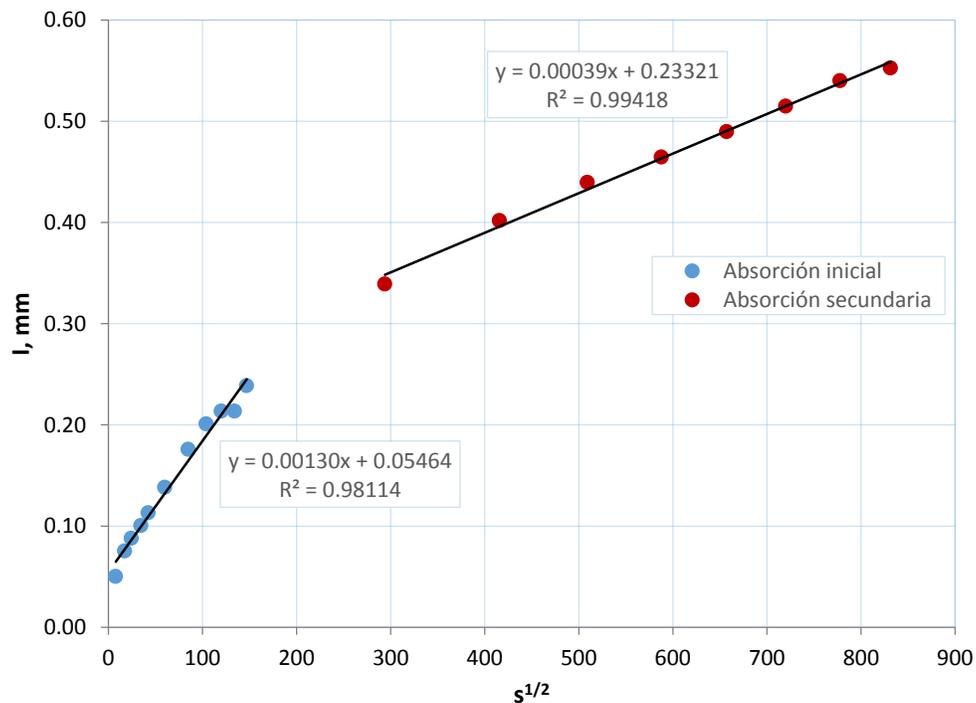


Figura 3.15 Ejemplo de cálculo de la velocidad de absorción primaria y secundaria de un espécimen de la mezcla “M6”, con un consumo de 400 kg/m³ de cemento y una sustitución parcial con ceniza volante de 10%.

3.2.8 Contracción por secado

Otro factor importante que se debe tomar en cuenta en el comportamiento del concreto es que puede sufrir cambios en su volumen, los cuales se traducen en la aparición de grietas en el concreto. Este comportamiento, si se presenta en un nivel moderado o si no existe restricción para su libre contracción, puede no afectar el comportamiento del concreto en la estructura; en el caso opuesto, puede alterar dicho comportamiento y también su durabilidad.

Uno de los mecanismos asociados a estos cambios volumétricos es la contracción por secado, la cual se produce por la pérdida de humedad de la pasta de cemento debido a la acción de agentes externos como la temperatura, viento y humedad relativa. El mecanismo comienza con la pérdida de agua en los poros capilares, seguido de la evaporación del agua de absorción contenida en los poros de gel.

Este efecto es irreversible y puede producir deformaciones unitarias desde 400×10^{-6} hasta 1100×10^{-6} . En concreto lanzado, este efecto además de estar asociado con la aparición de grietas, tiene un efecto adverso en la adherencia del concreto a la superficie sobre la cual fue lanzado, pues ésta se reduce. La contracción por secado varía con la proporción de la mezcla, pero generalmente es del orden de 0.06 a 0.10% en 3 meses (ACI 506R-05, 2010).

Debido a la forma de colocación de las mezclas de concreto lanzado, obtener un espécimen para ser sometido a este ensayo es complicado, por no mencionar imposible. Sin embargo, en este estudio, debido

a la forma en la que se elaboraron las mezclas de concreto lanzado, fue posible la obtención de 4 barras prismáticas de 7.5 x 7.5 x 28 cm para evaluar este comportamiento (figura 3.16).



Figura 3.16 Especímenes fabricados almacenados en la cámara seca.

El ensaye se realiza de acuerdo con la norma ASTM C 157. Los especímenes se curan 28 días sumergidos en agua con cal, dentro de un cuarto de curado con temperatura y humedad controladas; al final de este periodo, los especímenes se retiran del agua con cal y se llevan a una cámara seca, la cual está a una temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ y una humedad relativa de $50 \pm 4\%$, donde se almacenan los especímenes y se realizan las lecturas. La medición de la contracción por secado se basó en el cambio de longitud de los especímenes, medida con un comparador de longitudes (figura 3.17), que se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 490.



Figura 3.17 Comparador de longitudes utilizado y forma de medición.

4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los diferentes ensayos que se describen en el capítulo 3, así como su correspondiente análisis.

4.1 CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Los resultados de los ensayos en estado fresco realizados a cada una de las mezclas se muestran en la tabla 4.1. En el caso del ensayo de revenimiento, este se determinó antes y después de incorporar el (los) aditivo(s).

Tabla 4.1 Resultados de los ensayos en estado fresco

Mezcla	Revenimiento, cm			Peso Volumétrico P.V., kg/m ³		Contenido de aire, %	
	Sin aditivo	Con aditivo					
M1	0.5	5.7	0%*	2170.2	0%*	3.4	0%*
M2	0.3	4.0	0%*	2186.5	0%*	3.5	0%*
M3	0.6	4.5	-21.1%	2131.2	-1.8%	4.9	44.1%
M4	0.7	7.2	80.0%	2101.4	-3.9%	5.5	57.1%
M5	0.6	6.2	8.8%	2156.7	-0.6%	2.9	-14.7%
M6	0.2	5.0	25.0%	2162.4	-1.1%	3.2	-8.6%
M7	0.7	6.9	21.1%	2077.3	-4.3%	5.7	67.6%
M8	0.7	4.1	2.5%	2126.2	-2.8%	4.9	40.0%

* Diferencia respecto a la mezcla testigo

En general, los revenimientos de las 8 mezclas se ubican dentro del intervalo esperado (4 a 7.5 cm), con un promedio de 5.5 cm y desviación estándar de 1.2 cm. La mezcla con el menor revenimiento fue la mezcla testigo M2, con 4.0 cm, mientras que la mezcla con mayor revenimiento fue la mezcla M4, con 7.2 cm.

En la tabla 4.1 también se puede observar que las mezclas con aire incluido (M3, M4, M7, M8), tienen revenimientos mayores en comparación con los que tienen sus correspondientes mezclas testigo, a excepción de la mezcla M3, la cual disminuye 21.1%. Para las mezclas solo con sustitución parcial con ceniza volante (M5 y M6) los revenimientos fueron mayores en comparación con los que tienen sus correspondientes mezclas testigo; sin embargo, no se puede decir que la ceniza volante mejore la trabajabilidad de la mezcla, por el contrario, tiende a disminuirla ya que se tiene una mayor área específica y por ende aumenta el requerimiento de agua, o en este caso, de aditivo reductor de agua para lograr el revenimiento deseado.

La inclusión de aire, además de dar mayor fluidez a la mezcla, reduce el peso volumétrico en estado fresco de la misma (Neville, 1989); este hecho se puede ver con mayor claridad en la gráfica de la figura 4.1, donde las 4 mezclas con inclusión de aire tienen los pesos volumétricos menores de las 8 mezclas en estudio.

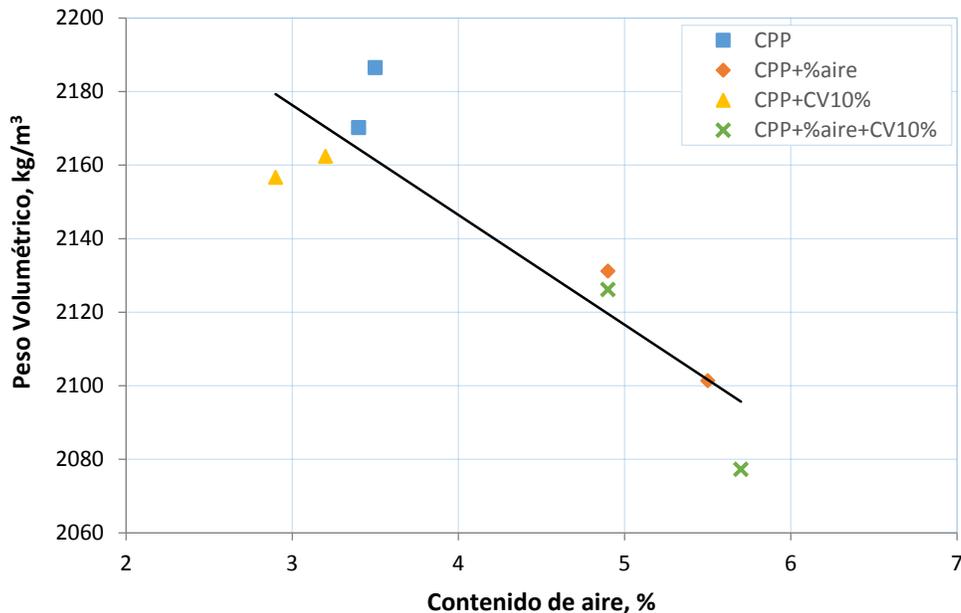


Figura 4.1 Variación del peso volumétrico con el contenido de aire.

Por otra parte, el peso volumétrico y el contenido de aire de las mezclas con solo sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M5 y M6) disminuyen en comparación con los que tienen sus correspondientes mezclas testigo. Esto se debe a que la ceniza volante tiene una menor densidad que el cemento; también, las partículas de ceniza volante son más finas, de tal forma que ocupan los vacíos entre las partículas de cemento, reduciendo así también el contenido de aire.

4.2 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Ensayes no destructivos: esclerómetro y velocidad de pulso ultrasónico

a) Esclerómetro

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados con el esclerómetro se muestran en la tabla 4.2; en esta tabla también se muestran el resultado global promedio a 28 y 91 días de edad y su porcentaje global de incremento.

El promedio del número de rebote obtenido en el ensaye con esclerómetro a 28 días de edad es de 27.5, mientras que a 91 días de edad es de 28.3; el incremento global promedio es de 3%. En general, para el esclerómetro utilizado en esta investigación, el número de rebote incrementa con la edad; para la mezcla

M5 el número de rebote se reduce de 28 a 91 días una décima, pero debido a la sensibilidad a la que es susceptible este ensaye, se puede considerar que el número de rebote a ambas edades es el mismo.

Tabla 4.2 Resultados obtenidos de los ensayes con esclerómetro

Mezcla	Relación a/c	Número rebote NR, 1	
		28 días	91 días
M1	0.49	27.3	29.0
M2	0.39	31.2	32.9
M3	0.49	27.0	27.6
M4	0.39	27.3	27.8
M5	0.49	26.8	26.7
M6	0.39	29.3	31.1
M7	0.49	22.3	22.7
M8	0.39	28.5	29.0
Promedio		27.5	28.3
Incremento con la edad, %		3	

Otro hecho que ratifica la sensibilidad de este ensaye es que para las mezclas con inclusión de aire (M3, M4, M7 y M8), el número de rebote no se incrementa significativamente con la edad, en comparación con el de las mezclas que no tienen aire incluido.

b) Velocidad de pulso ultrasónico

Los resultados obtenidos de los ensayes para determinar la VPU se muestran en la tabla 4.3; en esta tabla se muestra también el resultado global promedio a 28 y 91 días de edad y su porcentaje global de incremento.

El promedio a 28 días de edad es de 3886.6 m/s, mientras que a 91 días de edad es de 4035.3 m/s, con un incremento global promedio de 4%. Los concretos con relación a/c de 0.49 tienen VPU menores en comparación con las mezclas con relación a/c de 0.39. Esto se debe a un descenso en la densidad causado por el incremento en la relación a/c, que hace disminuir la VPU y también la resistencia a compresión simple (Neville, 1989).

Tabla 4.3 Resultados obtenidos de VPU

Mezcla	Relación a/c	Velocidad de pulso ultrasónico, VPU, m/s	
		28 días	91 días
M1	0.49	3864.1	4068.7
M2	0.39	4023.0	4165.1
M3	0.49	3819.3	3975.3
M4	0.39	3861.8	3984.5
M5	0.49	3895.6	4028.1
M6	0.39	4005.2	4114.2
M7	0.49	3697.7	3876.2
M8	0.39	3925.8	4070.0
Promedio		3886.6	4035.3
Incremento con la edad, %		4%	

Una clasificación de la calidad del concreto con base en la VPU se muestra en la tabla 4.4. Por otra parte, conforme a lo que establece la tabla 4.4, la clasificación de la calidad de los concretos de este estudio es buena tanto a 28 como a 91 días de edad (tabla 4.5).

Tabla 4.4 Clasificación de la calidad del concreto con base en la VPU (Neville, 1989)

VPU, m/s	Calidad del concreto
>4500	Excelente
3500 – 4500	Buena
3000 – 3500	Dudosa
2000 – 3000	Deficiente
<2000	Muy deficiente

Tabla 4.5 Clasificación de la calidad de los concretos con base en la VPU

Mezcla	VPU, m/s			
	28 días	Clasificación	91 días	Clasificación
M1	3864.1	Buena	4068.7	Buena
M2	4023.0	Buena	4165.1	Buena
M3	3819.3	Buena	3975.3	Buena
M4	3861.8	Buena	3984.5	Buena
M5	3895.6	Buena	4028.1	Buena
M6	4005.2	Buena	4114.2	Buena
M7	3697.7	Buena	3876.2	Buena
M8	3925.8	Buena	4070.0	Buena

4.2.2 Resistencia a compresión simple

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión simple de las mezclas en estudio se muestran en la tabla 4.6, así como su correspondiente variación respecto a las mezclas testigo. Los valores de resistencia a compresión simple obtenidos a 28 y 91 días de edad están dentro del intervalo de valores típicos de resistencia para mezclas de concreto lanzado por vía húmeda (ver tabla 1.2) a excepción de la mezcla M7 (282 kg/cm^2), cuya resistencia a compresión simple está por debajo del intervalo antes mencionado y tiene una recuperación a 91 días de edad (324 kg/cm^2); también, esta mezcla es la que tuvo el mayor contenido de aire (5.7%) de las 8 mezclas en estudio.

Las mezclas con aire incluido (M3 y M4), sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M5 y M6) y la combinación de ambas (M7 y M8) tienen valores de resistencia a compresión simple menores en comparación con las mezclas testigo a diferentes edades; su evolución se muestra en la figura 4.2.

Tabla 4.6 Resistencia a compresión simple y su variación respecto a las mezclas testigo

Mezcla	Relación A/C	Resistencia a compresión simple, $f'c$, kg/cm^2					
		7 días		28 días		91 días	
M1	0.49	287	0%	349	0%	424	0%
M2	0.39	352	0%	462	0%	537	0%
M3	0.49	246	-14%	332	-5%	384	-9%
M4	0.39	289	-18%	391	-15%	437	-19%
M5	0.49	245	-14%	346	-1%	391	-8%
M6	0.39	309	-12%	425	-8%	503	-6%
M7	0.49	217	-24%	282	-19%	324	-24%
M8	0.39	320	-9%	412	-11%	463	-14%

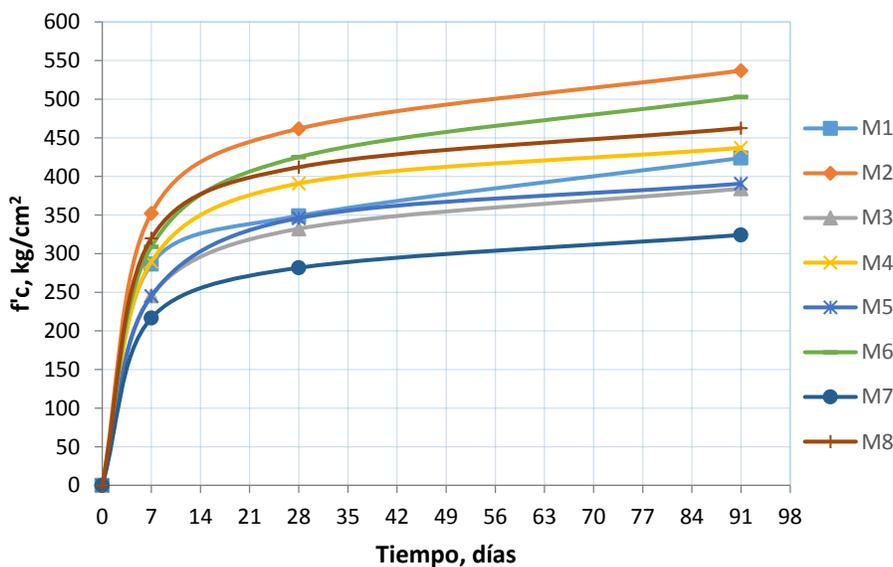


Figura 4.2 Evolución de la resistencia a compresión simple con la edad.

La razón de la disminución de la resistencia a compresión se debe a que las burbujas de aire, al ser huecas, no ofrecen capacidad de carga alguna y ocupan un cierto volumen de la masa de concreto; por otra parte, la ceniza volante forma compuestos con menor rapidez que el cemento, esto le permite seguir desarrollando resistencias a compresión a edades tardías; este efecto se puede observar en la tabla 4.7 y con mayor claridad para la mezcla M6. Esta reducción en la resistencia a compresión conforme se añade aire, ceniza volante y una combinación de ambos, también se puede observar en las gráficas de las figuras 4.3 y 4.4, donde se grafican los resultados de resistencia a compresión a 28 y 91 días respectivamente, diferenciándolas por su relación a/c.

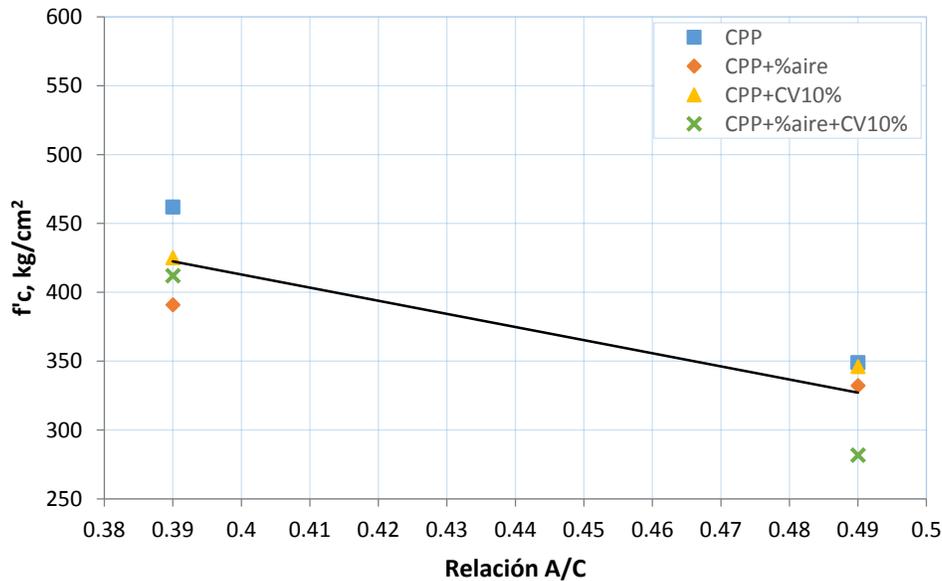


Figura 4.3 Variación de la resistencia a compresión a 28 días de edad con la relación a/c.

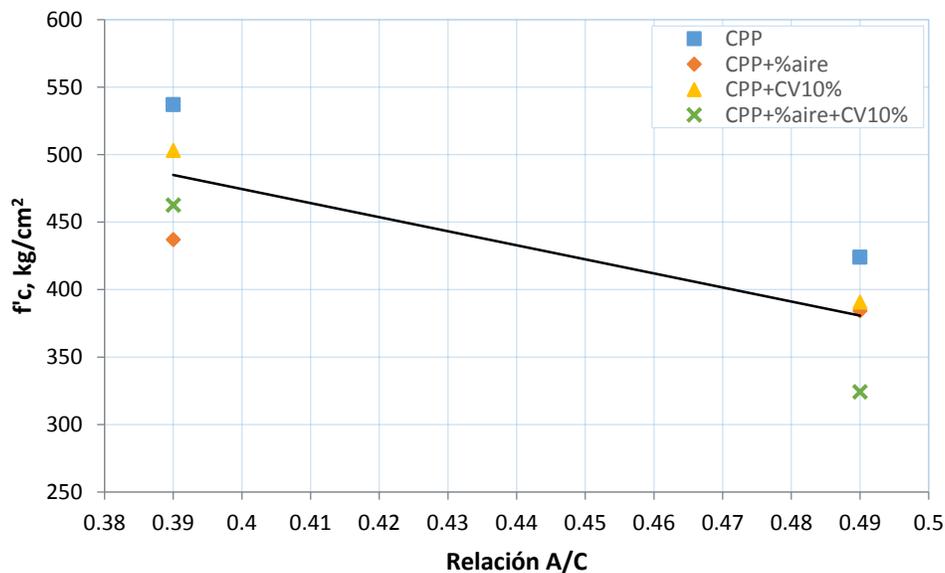


Figura 4.4 Variación de la resistencia a compresión a 91 días de edad con la relación a/c

Parte del análisis consistió también en calcular la variación de la resistencia a compresión relativa respecto a la edad del concreto (tabla 4.7) y mediante un ajuste por mínimos cuadrados, se calcularon las ecuaciones que permiten estimar la resistencia a compresión simple a cualquier edad, en función de la resistencia a compresión a 28 días de edad. Estas ecuaciones se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.7 Variación de la resistencia a compresión simple relativa con a la edad del concreto

Mezcla	Relación A/C	fc/f'c		
		7 días	28 días	91 días
M1	0.49	0.82	1.00	1.22
M2	0.39	0.76	1.00	1.16
M3	0.49	0.74	1.00	1.16
M4	0.39	0.74	1.00	1.12
M5	0.49	0.71	1.00	1.13
M6	0.39	0.73	1.00	1.18
M7	0.49	0.77	1.00	1.15
M8	0.39	0.78	1.00	1.12

Tabla 4.8 Ecuaciones para determinar la variación de la resistencia a compresión simple relativa con la edad del concreto

Mezcla	Relación A/C	Características	Expresión, t en días
M1	0.49	CPP	$\frac{f_{cM1}}{f'_{cM1}} = \frac{t}{4.398 + 0.780t}$
M2	0.39	CPP	$\frac{f_{cM2}}{f'_{cM2}} = \frac{t}{4.179 + 0.817t}$
M3	0.49	CPP+%aire	$\frac{f_{cM3}}{f'_{cM3}} = \frac{t}{4.298 + 0.820t}$
M4	0.39	CPP+%aire	$\frac{f_{cM4}}{f'_{cM4}} = \frac{t}{3.732 + 0.854t}$
M5	0.49	CPP+CV10%	$\frac{f_{cM5}}{f'_{cM5}} = \frac{t}{4.204 + 0.840t}$
M6	0.39	CPP+CV10%	$\frac{f_{cM6}}{f'_{cM6}} = \frac{t}{4.783 + 0.795t}$
M7	0.49	CPP+%aire+CV10%	$\frac{f_{cM7}}{f'_{cM7}} = \frac{t}{3.958 + 0.828t}$
M8	0.39	CPP+%aire+CV10%	$\frac{f_{cM8}}{f'_{cM8}} = \frac{t}{3.488 + 0.854t}$

En la tabla 4.7 y en la figura 4.5 se puede observar también que la tendencia a desarrollar resistencia es similar para cada pareja de concretos independientemente de su relación agua/cemento, es decir, concretos con solo cemento (M1 y M2), concretos con cemento y aire incluido (M3 y M4), concretos con

cemento y sustitución parcial con ceniza volante (M5 y M6), y concretos con cemento, aire y sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M7 y M8). Diferenciándolos de esta forma, es posible simplificar las ecuaciones de la tabla 4.8 en las ecuaciones de la tabla 4.9 y la gráfica de la figura 4.5 en la gráfica de la figura 4.6.

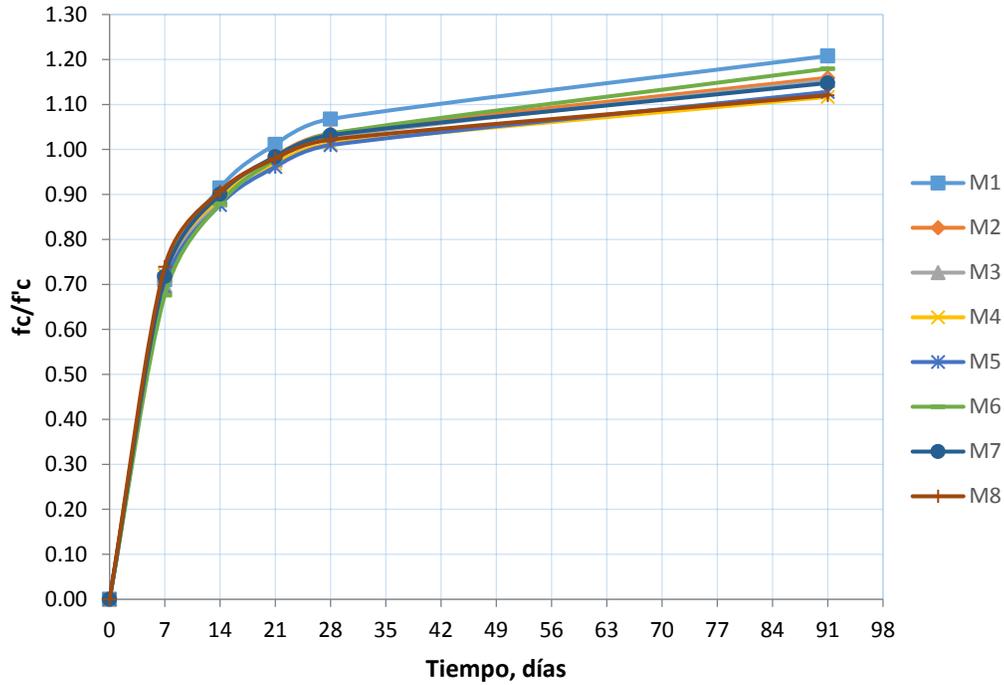


Figura 4.5 Variación de la resistencia a compresión simple relativa respecto a la edad

Tabla 4.9 Ecuaciones para determinar la variación de la resistencia a compresión simple relativa con la edad del concreto

Características de la mezcla	Expresión, t en días
CPP	$\frac{f_{c_{CPP}}}{f'_{c_{CPP}}} = \frac{t}{4.288 + 0.798t}$
CPP+%aire	$\frac{f_{c_{CPP+%aire}}}{f'_{c_{CPP+%aire}}} = \frac{t}{4.015 + 0.837t}$
CPP+CV10%	$\frac{f_{c_{CPP+CV10\%}}}{f'_{c_{CPP+CV10\%}}} = \frac{t}{4.494 + 0.818t}$
CPP+%aire+CV10%	$\frac{f_{c_{CPP+%aire+CV10\%}}}{f'_{c_{CPP+%aire+CV10\%}}} = \frac{t}{3.723 + 0.841t}$

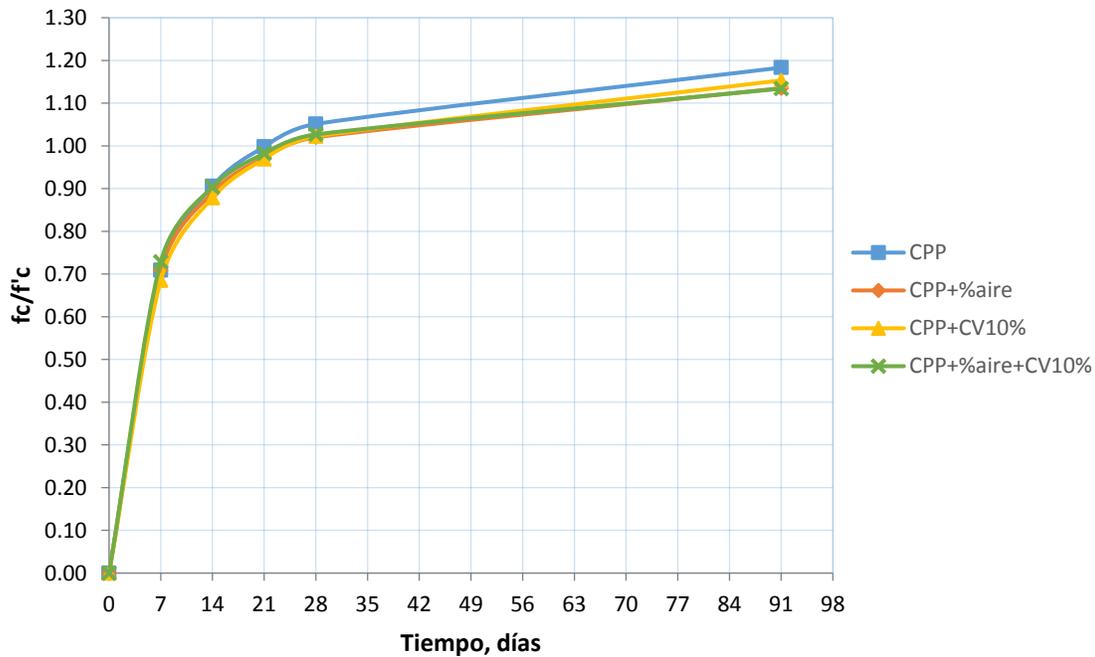


Figura 4.6 Variación promedio de la resistencia a compresión simple relativa respecto a la edad

4.2.3 Módulo de elasticidad, deformación unitaria máxima y relación de Poisson

Los resultados de módulo de elasticidad determinados a 28 y 91 días de edad para cada una de las mezclas en estudio, su variación respecto a las mezclas testigo y la relación que existe entre el módulo de elasticidad y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple correspondiente se muestran en la tabla 4.10. Estos valores de módulo de elasticidad están dentro del intervalo típico de valores de este parámetro para mezclas de concreto lanzado por vía húmeda (ver tabla 1.2).

Tabla 4.10 Variación del módulo de elasticidad con la resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

Mezcla	Relación A/C	Resistencia a compresión simple $f'c$, kg/cm ²		Módulo de elasticidad E_c , kg/cm ²				Relación $E_c/\sqrt{f'c}$	
		28 días	91 días	28 días		91 días		28 días	91 días
M1	0.49	349	424	205703	0%	221474	0%	11013	10757
M2	0.39	462	537	223289	0%	264146	0%	10391	11399
M3	0.49	332	384	194224	-6%	207648	-6%	10655	10594
M4	0.39	391	437	214146	-4%	222514	-16%	10832	10644
M5	0.49	346	391	192261	-7%	228558	3%	10335	11564
M6	0.39	425	503	210854	-6%	256803	-3%	10227	11451
M7	0.49	282	324	163349	-21%	192700	-13%	9733	10702
M8	0.39	412	463	208643	-7%	241643	-9%	10279	11236

Los valores de módulo de elasticidad tanto a 28 como a 91 días de edad tienden a reducirse conforme se añade aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, a excepción de la mezcla M5 a 91 días de edad, la cual tuvo un ligero incremento de 3% con respecto a su mezcla testigo. A pesar de esta reducción, la variación del módulo de elasticidad con respecto a las mezclas testigo es mínima, siendo la mezcla M7 la que tiene una mayor variación, con una reducción de 21% y 13% a 28 y 91 días de edad, respectivamente.

También, la relación $E_c/\sqrt{f'c}$ no difiere significativamente con la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, ni a las diferentes edades de ensaye. Esto nos permite establecer la expresión que se muestra en la figura 4.7, la cual relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión simple y que engloba a todas las mezclas ensayadas a 28 y 91 días de edad. Esta expresión se determinó calculando el promedio de las relaciones $E_c/\sqrt{f'c}$ a las diferentes edades de ensaye. En la figura 4.7 también se muestra la tendencia de estos parámetros, la cual no se ve afectada por la incorporación de aire, ceniza volante o una combinación de ambos en la mezcla.

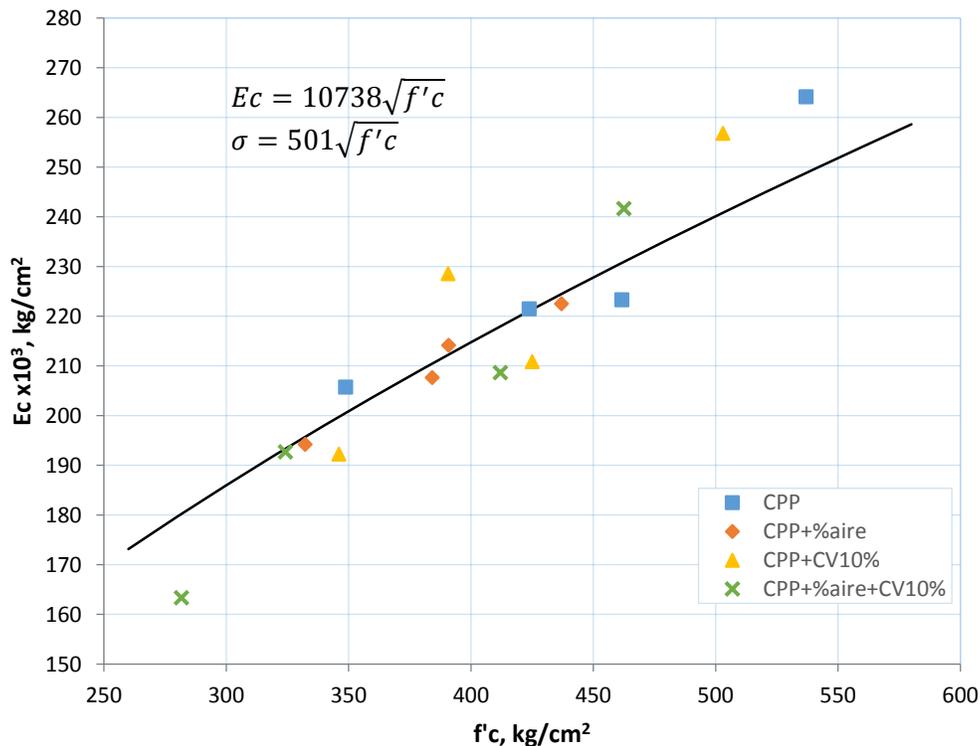


Figura 4.7 Relación entre módulo de elasticidad y resistencia a compresión simple.

Los resultados de las deformaciones unitarias máximas se muestran en la tabla 4.11 y su tendencia en la gráfica de la figura 4.8; en esta tabla se observa que la deformaciones unitarias máximas tienden a ser menores para las mezclas con aire incluido (M3, M4, M7 y M8) tanto a 28 como a 91 días de edad en comparación con sus correspondientes mezclas testigo; las mezclas solo con sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M5 y M6) tienen deformaciones unitarias máximas similares a las que tienen las mezclas testigo a 28 días de edad, mientras que a 91 días de edad tienen una ligera reducción.

A pesar de las observaciones descritas en el párrafo anterior, las deformaciones unitarias máximas no difieren significativamente conforme se añade aire, ceniza volante y una combinación de ambas a la mezcla, y tampoco se modifican significativamente con la edad del concreto; su promedio global es de 3.5×10^{-3} .

Tabla 4.11 Deformaciones unitarias máximas registradas a 28 y 91 días de edad

Mezcla	Relación A/C	Deformación unitaria máxima			
		$\epsilon_{u \max}$			
		28 días		91 días	
M1	0.49	0.0036	0%	0.0038	0%
M2	0.39	0.0038	0%	0.0035	0%
M3	0.49	0.0035	-4%	0.0036	-4%
M4	0.39	0.0032	-15%	0.0032	-9%
M5	0.49	0.0036	-1%	0.0035	-7%
M6	0.39	0.0037	-3%	0.0034	-4%
M7	0.49	0.0033	-8%	0.0032	-14%
M8	0.39	0.0032	-16%	0.0033	-7%

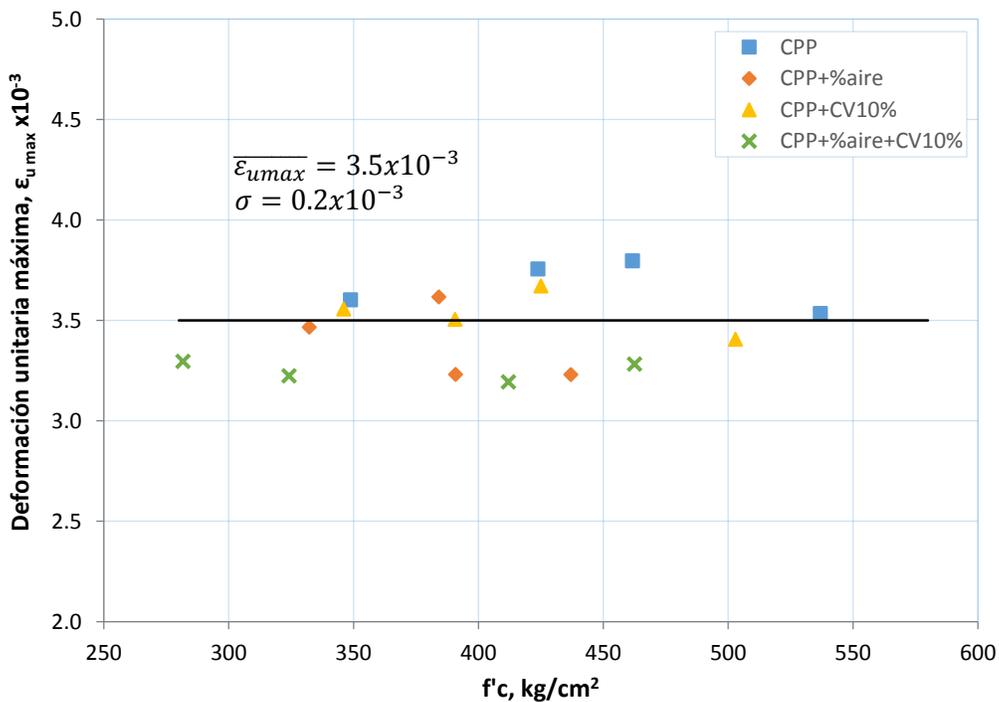


Figura 4.8 Relación entre deformación unitaria máxima y resistencia a compresión simple

Los resultados obtenidos de la relación de Poisson y su variación con respecto a las mezclas testigo se muestran en la tabla 4.12, así como la relación que hay entre este parámetro y la raíz cuadrada de su resistencia a compresión simple correspondiente.

Tabla 4.12 Variación de la relación de Poisson con la resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

Mezcla	Relación A/C	Resistencia a compresión simple $f'c$, kg/cm ²		Relación de Poisson μ , 1				Relación $\mu/\sqrt{f'c}$	
		28 días	91 días	28 días		91 días		28 días	91 días
M1	0.49	349	424	0.24	0%	0.23	0%	0.0126	0.0111
M2	0.39	462	537	0.26	0%	0.31	0%	0.0120	0.0136
M3	0.49	332	384	0.22	-6%	0.24	5%	0.0121	0.0123
M4	0.39	391	437	0.24	-6%	0.26	-17%	0.0122	0.0125
M5	0.49	346	391	0.23	-3%	0.24	3%	0.0123	0.0120
M6	0.39	425	503	0.25	-4%	0.27	-15%	0.0120	0.0119
M7	0.49	282	324	0.34	44%	0.22	-6%	0.0203	0.0120
M8	0.39	412	463	0.26	0%	0.24	-25%	0.0128	0.0109

A 28 días de edad, la relación de Poisson disminuye y tiende a acercarse a los valores que tienen las mezclas testigo conforme se añade aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla; a 91 días de edad este porcentaje de reducción se incrementa con respecto al obtenido a 28 días de edad, a excepción de las mezclas M3 y M5, las cuales aumentan 5% y 3%, respectivamente, con respecto a su mezcla testigo que es la mezcla M1.

La gráfica de la figura 4.9 muestra la variación de este parámetro con la resistencia a compresión simple y se observa una tendencia global que puede ser representada como el promedio de los resultados obtenidos a 28 y 91 días de edad ($\bar{\mu} = 0.25$, desviación estándar $\sigma = 0.02$); en el cálculo de este promedio no se tomó en consideración la relación de Poisson de la mezcla M7 determinada a 28 días de edad ($\bar{\mu} = 0.34$), y tampoco se tomó en cuenta para la elaboración de la gráfica antes mencionada.

También, la relación $\mu/\sqrt{f'c}$ no difiere significativamente con la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, ni a las diferentes edades de ensaye, a excepción de la mezcla M7 a 28 días de edad. Al igual que en el análisis del módulo de elasticidad, se determinó una expresión que relaciona la relación de Poisson con la resistencia a compresión simple y que engloba a todas las mezclas ensayadas a 28 y 91 días de edad, calculando el promedio de las relaciones $\mu/\sqrt{f'c}$; al igual que en el cálculo de la relación de Poisson promedio, el valor de la relación $\mu/\sqrt{f'c}$ de la mezcla M7 determinada a 28 días de edad ($\mu/\sqrt{f'c} = 0.0203$) se omitió en el cálculo. Esta expresión se muestra en la gráfica de la figura 4.9.

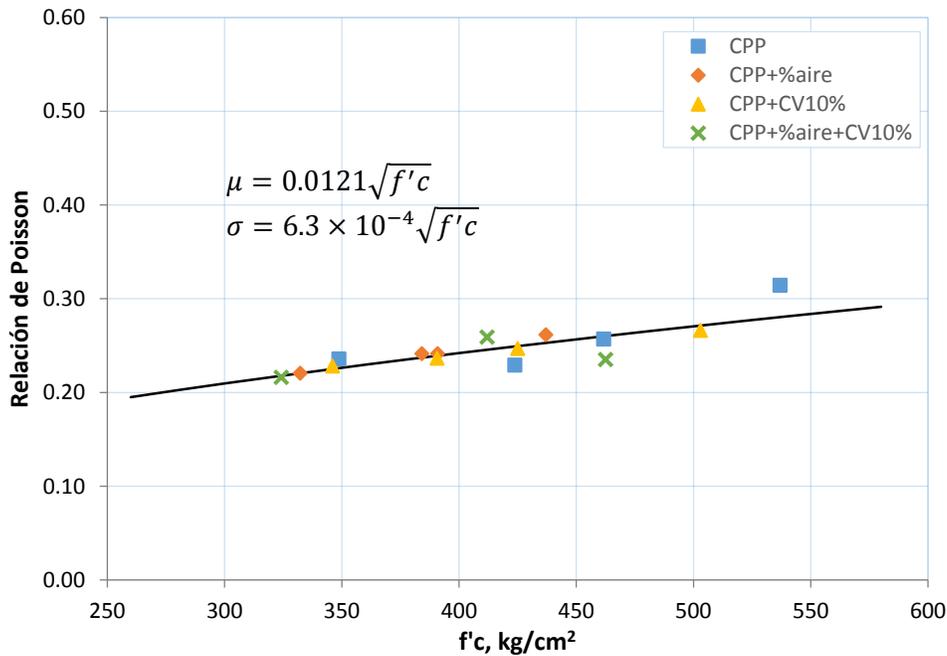


Figura 4.9 Variación de la relación de Poisson con la resistencia a compresión simple

4.2.4 Resistencia a tensión por compresión diametral

Los resultados obtenidos del ensaye de resistencia a tensión por compresión diametral se muestran en la tabla 4.13, así como la variación que estos tienen con sus correspondientes valores de resistencia a compresión simple. La gráfica de la figura 4.10 muestra la variación que tienen estos parámetros.

Tabla 4.13 Variación de la resistencia a tensión por compresión diametral con la resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

Mezcla	Relación A/C	Resistencia a compresión simple f'c, kg/cm²		Resistencia a tensión por compresión diametral ft, kg/cm²		Relación ft/√f'c	
		28 días	91 días	28 días	91 días	28 días	91 días
M1	0.49	349	424	23.5	31.7	1.26	1.54
M2	0.39	462	537	25.7	36.8	1.19	1.59
M3	0.49	332	384	24.0	30.5	1.32	1.56
M4	0.39	391	437	27.5	30.8	1.39	1.47
M5	0.49	346	391	24.6	32.9	1.32	1.67
M6	0.39	425	503	32.1	35.3	1.56	1.57
M7	0.49	282	324	24.9	28.8	1.48	1.60
M8	0.39	412	463	29.8	30.7	1.47	1.43

A 28 días de edad, los valores de resistencia a tensión se incrementan conforme se añade a la mezcla aire (mezclas M3 y M4), ceniza volante (mezclas M5 y M6) y una combinación de ambos (mezclas M7 y M8), siendo las mezclas testigo las que tienen los valores de resistencia a tensión menores de todo el conjunto de mezclas. A 91 días de edad, esta tendencia cambia, siendo ahora las mezclas testigo las que tienen los valores de resistencia a tensión mayores de todo el conjunto de mezclas, a excepción de la mezcla M5, cuyo valor de resistencia a tensión sigue la tendencia de los resultados a 28 días de edad, mientras que las mezclas con aire incluido son las que reportan los valores menores.

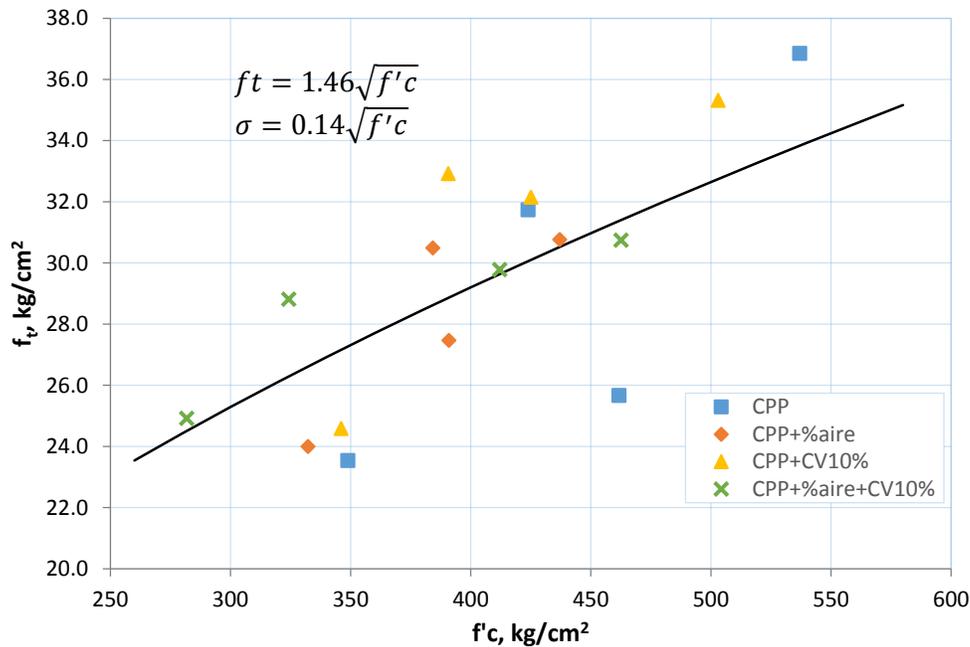


Figura 4.10 Relación entre la resistencia a tensión por compresión diametral y la resistencia a compresión simple

Al igual que en el análisis del módulo de elasticidad y de la relación de Poisson y siguiendo el mismo procedimiento de cálculo realizado en estos ensayos, con las relaciones $f_t/\sqrt{f'c}$ se determinó una expresión que relaciona la resistencia a tensión por compresión diametral con la resistencia a compresión simple y que engloba a todas las mezclas ensayadas a 28 y 91 días de edad, así como su variación; esta expresión se muestra en la gráfica de la figura 4.10.

4.2.5 Ensayo rápido de penetración de iones cloruro

Los resultados obtenidos del ERPC y su variación respecto a las mezclas testigo se muestran en la tabla 4.14, así como la clasificación de la permeabilidad o penetrabilidad que tienen las mezclas en estudio a 28 y 91 días de edad, de acuerdo con la norma ASTM C 1202 (ver tabla 1.5).

En la tabla 4.14 se observa que todas las mezclas tienen una penetrabilidad al ion cloruro alta a 28 días de edad; a 91 días de edad, todas las mezclas redujeron la carga que atraviesan por los especímenes ensayados en promedio un 65%. Las mezclas con relación a/c de 0.49 (M1, M3, M5 y M7) pasaron de una clasificación alta a 28 días de edad, a una clasificación moderada a 91 días de edad, apenas superando el

límite de los 2000 Coulombs. Las mezclas con relación a/c de 0.39 (M2, M4, M6 y M8) pasaron de una clasificación alta a 28 días de edad a una clasificación baja a 91 días de edad. Esto se debe a que la reacción del cemento y la ceniza volante continúan en presencia de agua de curado. Este efecto se puede ver con mayor claridad en las gráficas de barras de las figuras 4.11 y 4.12

Tabla 4.14 Resultados del ERPC y su variación respecto a las mezclas testigo

Mezcla	Relación a/c	28 días de edad			91 días de edad			Reducción con la edad
		Carga que pasa, C		Clasificación	Carga que pasa, C		Clasificación	
M1	0.49	6774	0%	Alta	2573	0%	Moderada	-62%
M2	0.39	6349	0%	Alta	1745	0%	Baja	-73%
M3	0.49	6341	-6%	Alta	2148	-17%	Moderada	-66%
M4	0.39	5540	-13%	Alta	1744	0%	Baja	-69%
M5	0.49	6027	-11%	Alta	2090	-19%	Moderada	-65%
M6	0.39	4394	-31%	Alta	1450	-17%	Baja	-67%
M7	0.49	5166	-24%	Alta	2185	-15%	Moderada	-58%
M8	0.39	4147	-35%	Alta	1524	-13%	Baja	-63%

En las figuras 4.11 y 4.12 también se puede observar la influencia de añadir aire y ceniza volante a la mezcla. Tanto a 28 como a 91 días de edad, las mezclas testigo son la que tienen la mayor cantidad de carga que pasa; esta se va reduciendo conforme se añade aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla.

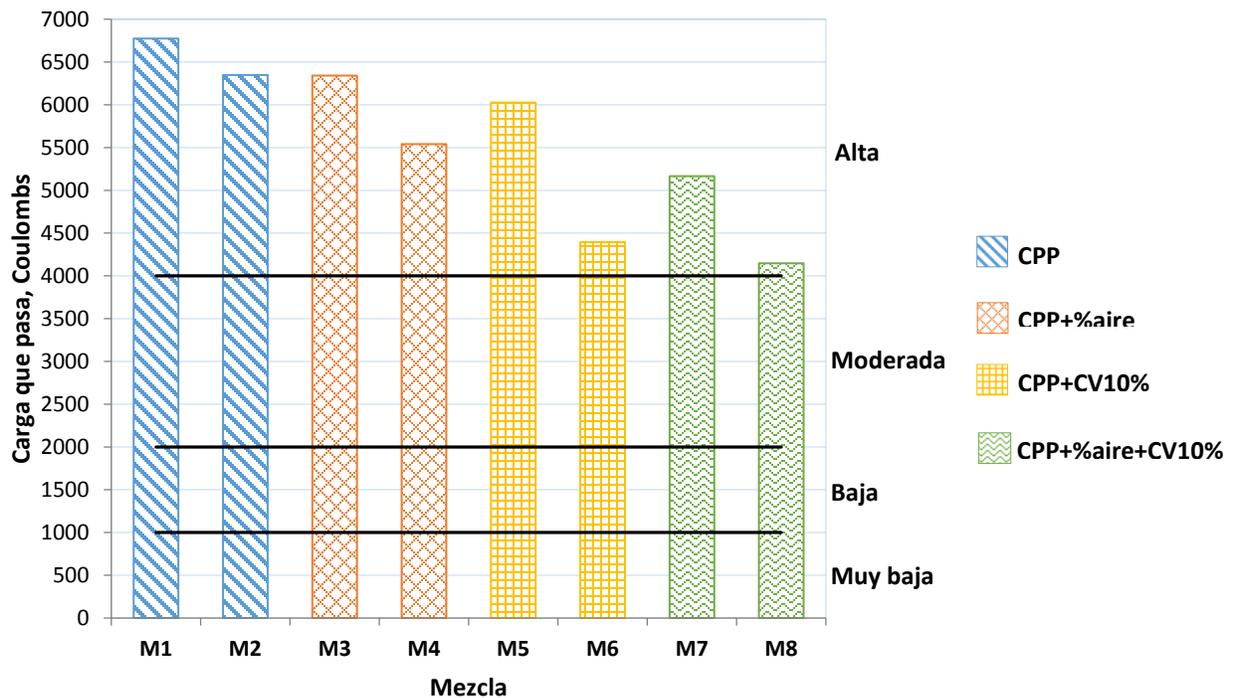


Figura 4.11 Penetrabilidad del ion cloruro a 28 días de edad

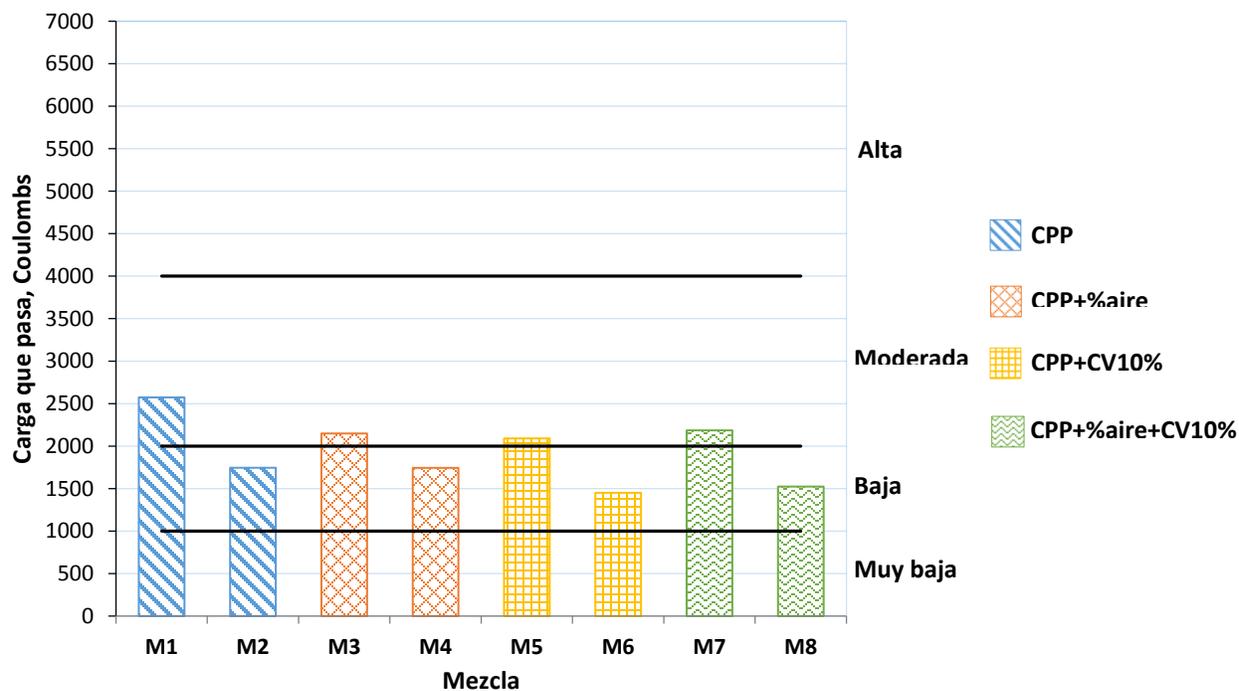


Figura 4.12 Penetrabilidad del ion cloruro a 91 días de edad

La inclusión de aire reduce la permeabilidad debido a que los poros de aire incluido no se llenan con los productos de hidratación y reducen el volumen de poros capilares, pues parte del volumen de la pasta de cemento lo constituye el aire incluido (Neville, 1989). Por otra parte la ceniza volante tiene mayor finura que el cemento, lo cual provoca que la ceniza volante ocupe los vacíos de la mezcla de una mejor forma de la que lo haría el cemento por sí solo.

4.2.6 Absorción en agua hirviendo y volumen de vacíos permeables

Los resultados de la AAH y el VVP de las mezclas en estudio, su variación con respecto a las mezclas testigo y su clasificación de la calidad con base en los índices de Morgan, 1987 (ver tabla 1.4) a 28 días de edad, se muestran en la tabla 4.15. En esta tabla se observa que todas las mezclas tienen una calidad marginal tanto en AAH como en VVP, a excepción de la mezcla M2, que logra tener una clasificación razonable para ambos parámetros.

A diferencia del ERPC, la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, a 28 días de edad no muestra grandes beneficios, por el contrario, tanto la AAH como el VVP se incrementan conforme se añaden estos materiales, siendo las mezclas con aire incluido (M3, M4, M7 y M8) las que reportan los mayores valores en ambos parámetros. Este efecto se ve con mayor claridad en las gráficas de barras de las figuras 4.13 y 4.14, donde se muestran los resultados de la AAH y el VVP, respectivamente, a 28 días de edad de las mezclas en estudio.

Tabla 4.15 Resultados de la AAH y el VVP y su variación respecto a las mezclas testigo a 28 días de edad

Mezcla	Relación a/c	AAH, %		Clasificación	VVP, %		Clasificación
M1	0.49	11.0	0%	Marginal	21.5	0%	Marginal
M2	0.39	8.8	0%	Razonable	17.7	0%	Razonable
M3	0.49	11.4	3.6%	Marginal	22.2	3.3%	Marginal
M4	0.49	11.5	30.7%	Marginal	21.4	20.9%	Marginal
M5	0.49	11.3	2.7%	Marginal	22.0	2.3%	Marginal
M6	0.49	9.8	11.4%	Marginal	19.3	9.0%	Marginal
M7	0.49	17.4	58.2%	Marginal	32.0	48.8%	Marginal
M8	0.39	12.2	38.6%	Marginal	23.6	33.3%	Marginal

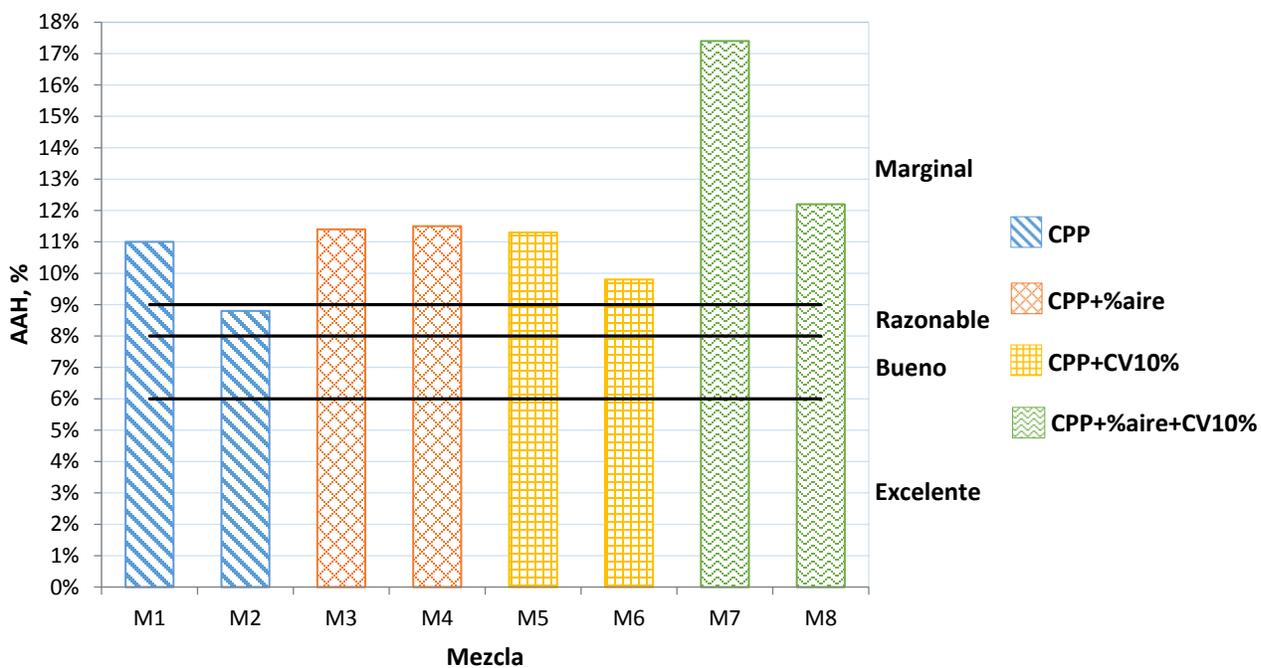


Figura 4.13 AAH a 28 días de edad.

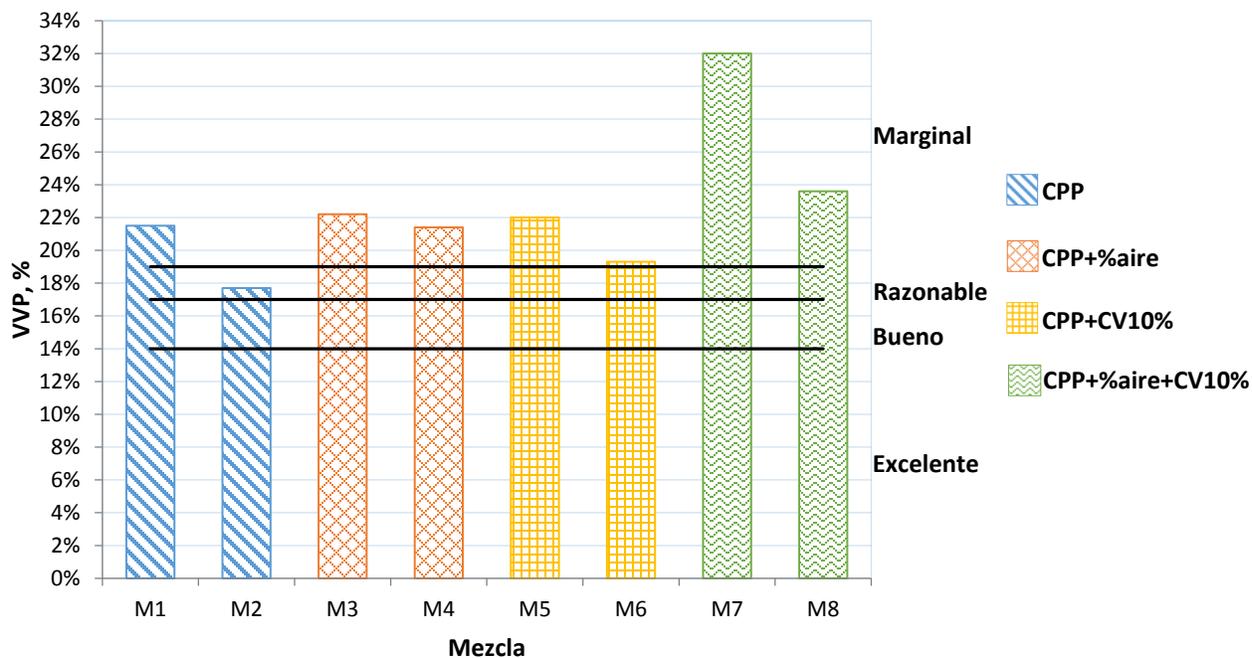


Figura 4.14 VVP a 28 días de edad

Por otra parte, las características que se muestran en la tabla 4.15 pero para la edad de 91 días se muestran en la tabla 4.16. En esta tabla se observa que todos los concretos tienen una calidad marginal, incluso la mezcla M2, cuya calidad a 28 días de edad fue razonable, con una AAH de 8.8% y un VVP de 17.7%.

Tabla 4.16 Resultados de la AAH y el VVP y su variación respecto a las mezclas testigo a 91 días de edad

Mezcla	Relación a/c	AAH, %		Clasificación	VVP, %		Clasificación
M1	0.49	11.8	0%	Marginal	23.2	0%	Marginal
M2	0.39	10.3	0%	Marginal	20.8	0%	Marginal
M3	0.49	11.9	0.8%	Marginal	22.8	-1.7%	Marginal
M4	0.49	11.5	11.7%	Marginal	21.5	3.4%	Marginal
M5	0.49	12.2	3.4%	Marginal	23.6	1.7%	Marginal
M6	0.49	10.9	5.8%	Marginal	21.4	2.9%	Marginal
M7	0.49	12.9	9.3%	Marginal	24.2	4.3%	Marginal
M8	0.39	11.3	9.7%	Marginal	21.8	4.8%	Marginal

A esta edad de ensaye, la inclusión de aire, la adición de ceniza volante y una combinación de ambas a la mezcla mejoran su comportamiento en comparación con el que tuvieron a 28 días de edad. En promedio, los valores de AAH y VVP a 91 días de edad para las mezclas con relación a/c de 0.49 fue de 12.2% y 23.5%, respectivamente, mientras que para las mezclas con relación a/c de 0.39 fue 11.0% y 21.4%. A pesar de esta mejoría en el comportamiento de las mezclas con aire incluido y ceniza volante, los valores de estos parámetros siguen siendo ligeramente mayores en comparación con los de sus correspondientes mezclas testigo, a excepción de la mezcla M3, la cual logra reducir su VVP 1.7%.

Las gráficas de barras de las figuras 4.15 y 4.16 muestran el comportamiento antes descrito.

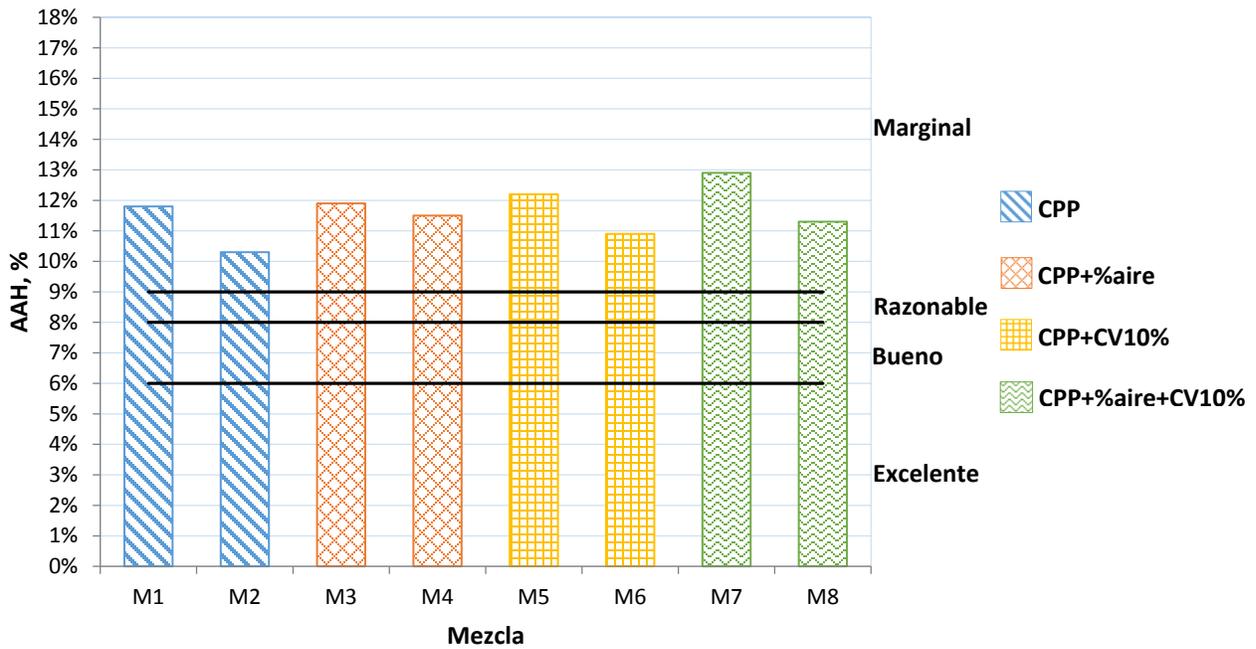


Figura 4.15 AAH a 91 días de edad

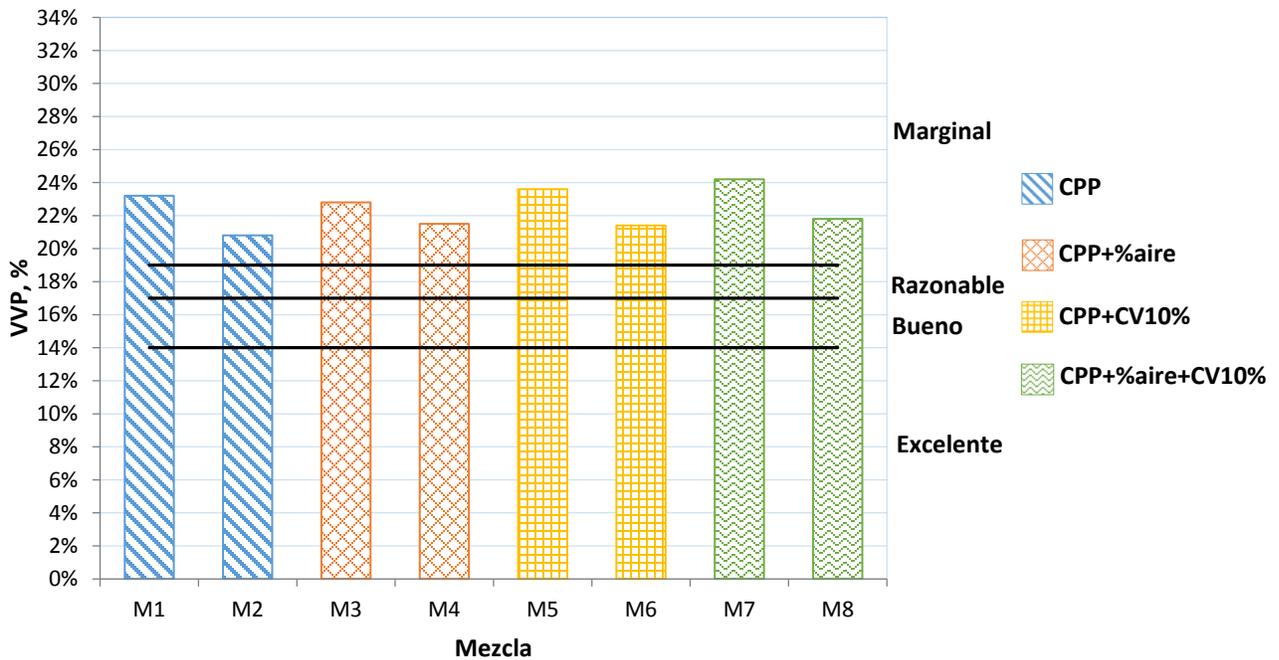


Figura 4.16 VVP a 91 días de edad

Por último, en la tabla 4.17 no se observa una tendencia clara sobre la variación de la AAH y el VVP conforme a la edad del concreto. En general, la mezcla testigo M1 y las mezclas solo con aire incluido (M3

y M4) mantienen sus valores de AAH constantes; la mezcla testigo M2 y las mezclas solo con sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M5 y M6) incrementaron el valor de este parámetro, mientras que las mezclas con aire incluido y con sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M7 y M8) redujeron su porcentaje de AAH.

Tabla 4.17 Comparativa de la AAH y el VVP a 28 y 91 días de edad

Mezcla	AAH, %		VVP, %	
	28 días	91 días	28 días	91 días
M1	11.0%	11.8%	21.5%	23.2%
M2	8.8%	10.3%	17.7%	20.8%
M3	11.4%	11.9%	22.2%	22.8%
M4	11.5%	11.5%	21.4%	21.5%
M5	11.3%	12.2%	22.0%	23.6%
M6	9.8%	10.9%	19.3%	21.4%
M7	17.4%	12.9%	32.0%	24.2%
M8	12.2%	11.3%	23.6%	21.8%

En cuanto a los valores de VVP, las mezclas testigo (M1 y M2) y las mezclas solo con sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M5 y M6) incrementaron el valor de este parámetro; las mezclas solo con aire incluido (M3 y M4) mantienen, en promedio, constante este valor, mientras que las mezclas con aire incluido y con sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M7 y M8), al igual que con su valor de AAH, redujeron su VVP.

4.2.7 Absorción capilar

Las tasas de absorción inicial y secundaria determinadas a cada una las mezclas en estudio a 28 y 91 días de edad y su variación con respecto a las mezclas testigo se muestran en la tabla 4.18.

Tabla 4.18 Resultados del ensaye de absorción capilar y su variación respecto a las mezclas testigo a 28 y 91 días de edad

Mezcla	Relación A/C	28 días de edad				91 días de edad			
		Absorción inicial		Absorción secundaria		Absorción inicial		Absorción secundaria	
		$S_i \times 10^{-4}$, mm/s ^{1/2}	%	$S_s \times 10^{-4}$, mm/s ^{1/2}	%	$S_i \times 10^{-4}$, mm/s ^{1/2}	%	$S_s \times 10^{-4}$, mm/s ^{1/2}	%
M1	0.49	16.6	0%	1.9	0%	8.1	0%	2.1	0%
M2	0.39	6.9	0%	1.9	0%	5.3	0%	1.6	0%
M3	0.49	9.8	-41%	2.8	50%	6.5	-19%	1.6	-27%
M4	0.39	11.5	66%	2.8	50%	6.3	20%	1.7	2%
M5	0.49	23.3	40%	3.2	70%	13.7	69%	1.9	-11%
M6	0.39	11.2	62%	3.2	71%	7.3	38%	1.7	2%
M7	0.49	16.1	-3%	2.3	24%	10.2	26%	2.4	13%
M8	0.39	8.6	25%	1.8	-5%	6.0	13%	1.1	-36%

A 28 días de edad, la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla no muestra grandes beneficios. La tasa de absorción inicial para las mezclas con relación a/c de 0.49 se reduce con la adición de los materiales antes mencionados, a excepción de la mezcla M5, la cual tiene una sustitución parcial de cemento con ceniza volante y cuya tasa de absorción inicial aumenta 40% con respecto a la mezcla testigo. En el caso de las mezclas con relación a/c de 0.39, la tasa de absorción inicial aumenta con la adición de estos materiales, en comparación con su correspondiente mezcla testigo.

A esta misma edad, la tasa de absorción secundaria aumenta con la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, en comparación con las mezclas testigo e independientemente de su relación a/c, a excepción de la mezcla M8, la cual reduce su tasa de absorción secundaria 5%.

De hecho; para cada pareja de concretos, es decir, concretos con solo cemento (M1 y M2), concretos con cemento y aire incluido (M3 y M4), concretos con cemento y sustitución parcial con ceniza volante (M5 y M6), y concretos con cemento, aire y sustitución parcial con ceniza volante (M7 y M8), la tasa de absorción secundaria es la misma, a excepción de las mezclas M7 y M8, donde la mezcla con menor relación a/c (mezcla M8) tiene una tasa de absorción secundaria menor.

Lo antes descrito se aprecia con mejor claridad en las gráficas de barras de las figuras, 4.17 y 4.18, donde se representan los resultados de las tasas de absorción inicial y secundaria determinadas a 28 días de edad, respectivamente.

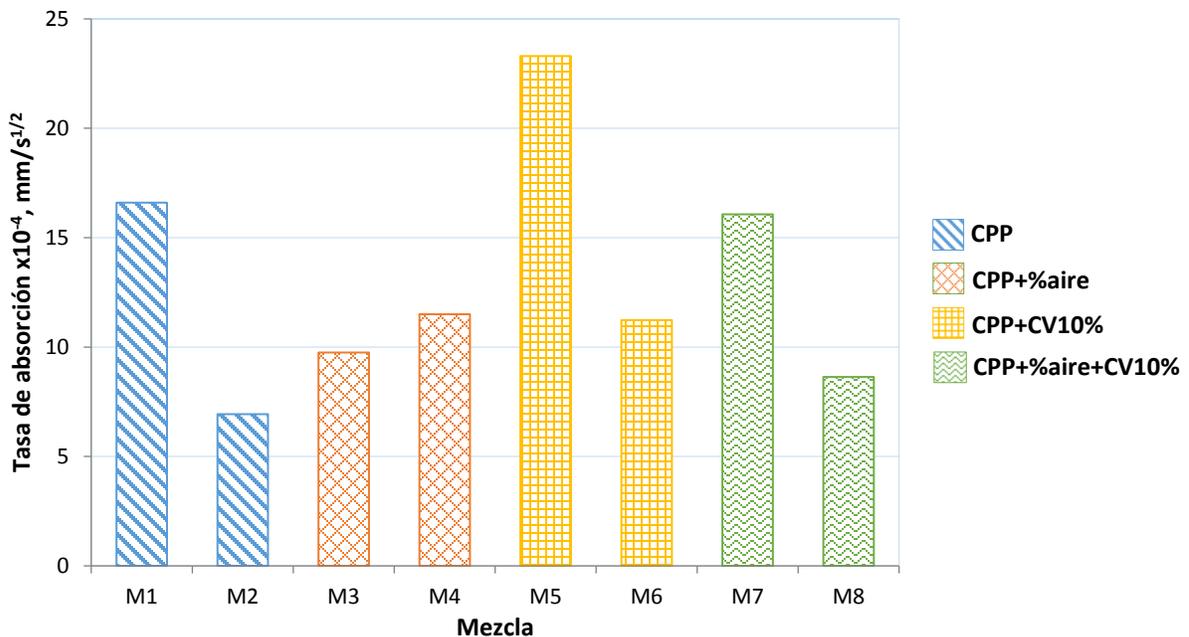


Figura 4.17 Tasa de absorción inicial a 28 días de edad.

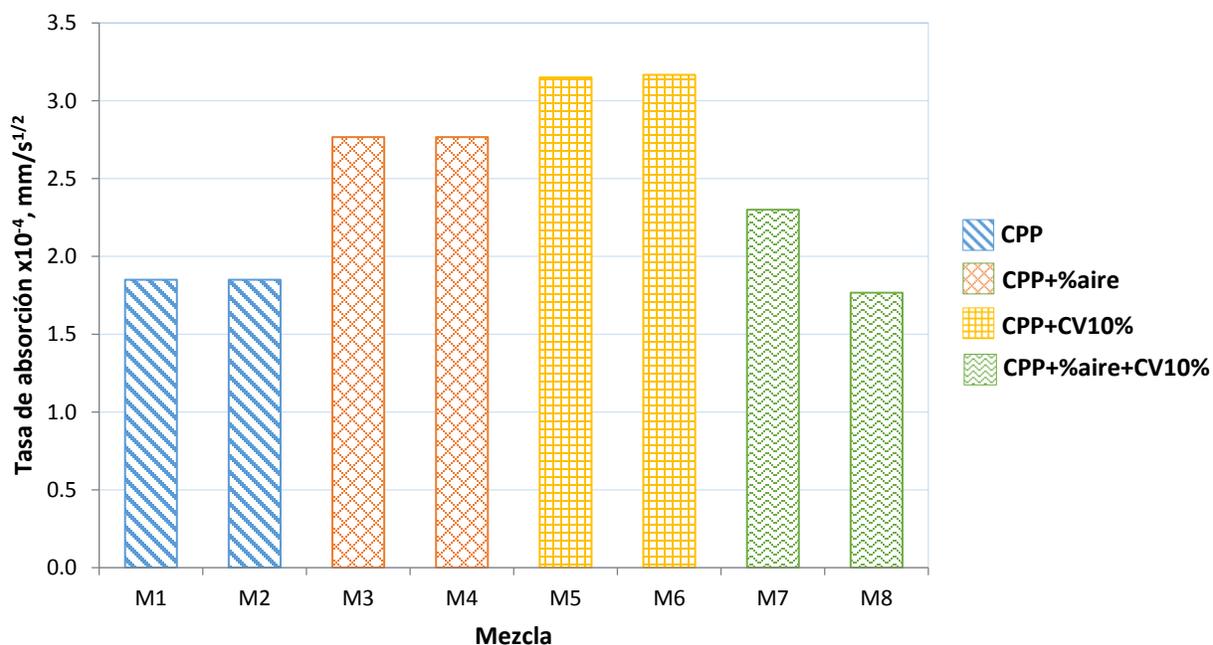


Figura 4.18 Tasa de absorción secundaria a 28 días de edad

A 91 días de edad, tanto la tasa de absorción inicial como la tasa de absorción secundaria se reducen, en comparación con los valores obtenidos de estas tasas a 28 días de edad. En el caso de las tasas de absorción inicial, estas son mayores con la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, en comparación con las de las mezclas testigo, a excepción de la mezcla M3, la cual reduce esta tasa 19%.

Por su parte, la tasa de absorción secundaria a 91 días de edad se reduce en las mezclas con relación a/c de 0.49 con la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, a excepción de la mezcla M7, la cual aumenta esta tasa 13% en comparación con la mezcla testigo; caso contrario al que ocurre con las mezclas con relación a/c de 0.39, donde tanto la mezcla M4 como la mezcla M6 aumentan 2% el valor de esta tasa, mientras que la mezcla M8 reduce 36%.

En las gráficas de barras de las figuras 4.19 y 4.20 se aprecia con mayor claridad lo descrito en los párrafos anteriores, donde se muestran las tasas de absorción inicial y secundaria determinadas a 91 días de edad, respectivamente.

Con los resultados obtenidos de este ensaye, parecería que añadir aire y ceniza volante a la mezcla podría ser poco favorable en cuanto a la disminución de las tasas de absorción inicial y secundaria a diferentes edades de ensaye, sin embargo, esta idea no está apoyada en la literatura.

Además, los resultados muestran que en algunas mezclas, la inclusión de estos materiales fueron benéficas en comparación con los de sus correspondientes mezclas testigo; también, los resultados son poco consistentes si se considera la relación a/c y la edad del concreto; por lo que estos resultados podrían ser engañosos.

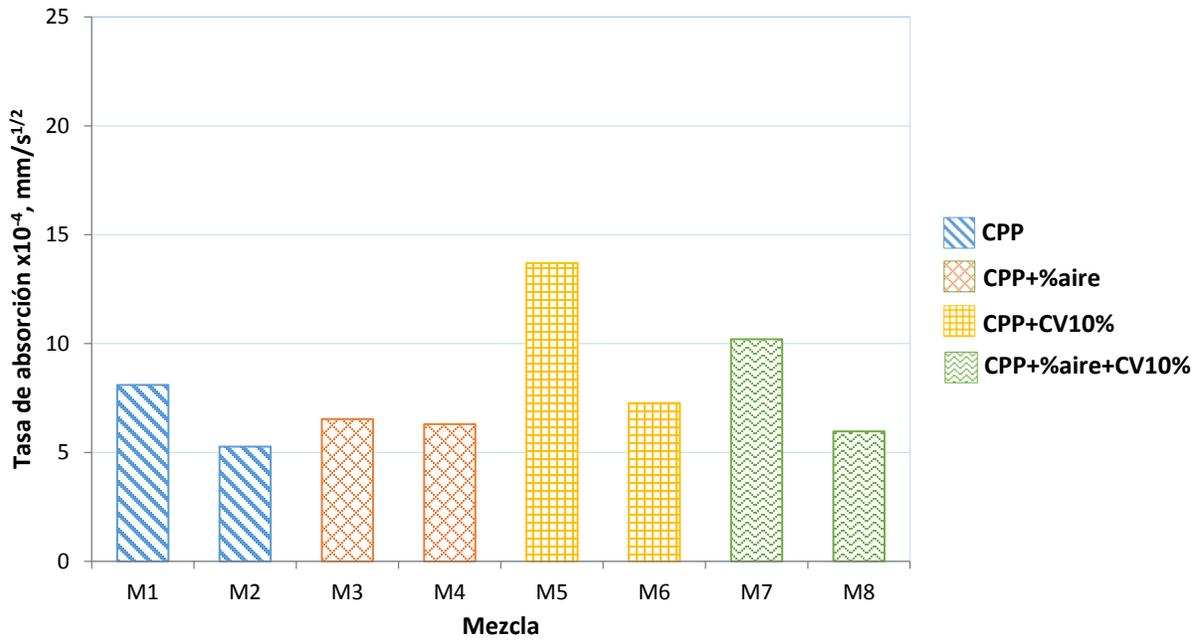


Figura 4.19 Tasa de absorción inicial a 91 días de edad

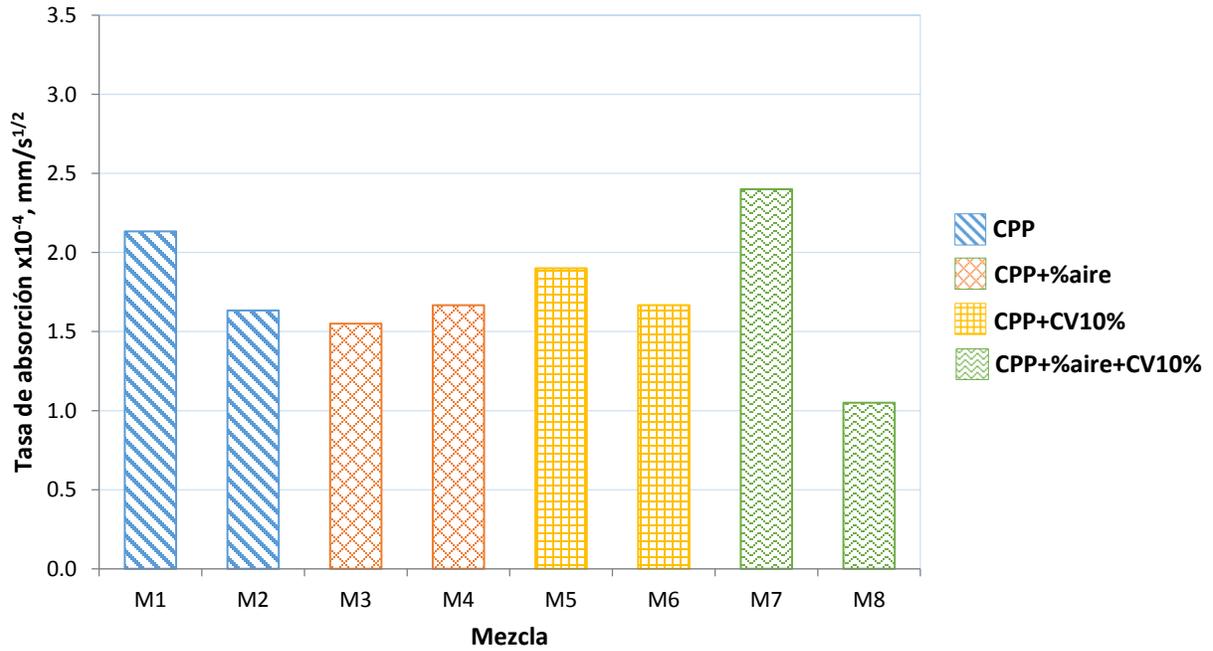


Figura 4.20 Tasa de absorción secundaria a 91 días de edad

4.2.8 Contracción por secado

En la tabla 4.19 se muestran los valores de contracción por secado últimos de cada mezcla, los cuales fueron calculados a partir de las lecturas realizadas entre 92 y 113 días de exposición de los especímenes almacenados en la cámara seca. También se muestra la variación de la contracción por secado última con respecto a las mezclas testigo, así como las expresiones para calcular la contracción por secado a diferentes edades. Con estas expresiones se elaboró la gráfica de la figura 4.21, la cual muestra la variación de la contracción por secado con el tiempo de las mezclas en estudio.

Tabla 4.19 Contracción por secado última, variación respecto a las mezclas testigo y expresión para la estimación de la contracción a diferentes edades

Mezcla	Relación A/C	Características	Contracción por secado última $\times 10^{-6}$		Expresión para estimar la contracción a diferentes edades, t en días
M1	0.49	CPP	1192	0%	$\varepsilon_{t_{M1}} = \left(\frac{t}{4.23 + t}\right) 1192 \times 10^{-6}$
M2	0.39	CPP	1110	0%	$\varepsilon_{t_{M2}} = \left(\frac{t}{4.51 + t}\right) 1110 \times 10^{-6}$
M3	0.49	CPP+%aire	1213	2%	$\varepsilon_{t_{M3}} = \left(\frac{t}{4.99 + t}\right) 1213 \times 10^{-6}$
M4	0.39	CPP+%aire	1151	4%	$\varepsilon_{t_{M4}} = \left(\frac{t}{4.92 + t}\right) 1151 \times 10^{-6}$
M5	0.49	CPP+CV10%	1126	-6%	$\varepsilon_{t_{M5}} = \left(\frac{t}{5.07 + t}\right) 1126 \times 10^{-6}$
M6	0.39	CPP+CV10%	1055	-5%	$\varepsilon_{t_{M6}} = \left(\frac{t}{5.14 + t}\right) 1055 \times 10^{-6}$
M7	0.49	CPP+%aire+CV10%	1207	1%	$\varepsilon_{t_{M7}} = \left(\frac{t}{4.77 + t}\right) 1207 \times 10^{-6}$
M8	0.39	CPP+%aire+CV10%	1041	-6%	$\varepsilon_{t_{M8}} = \left(\frac{t}{4.61 + t}\right) 1041 \times 10^{-6}$

En la tabla 4.19 se observa que los valores de contracción por secado última de las mezclas en estudio son mayores en comparación con los de concreto convencional; esto se debe a que se tienen mayores cantidades de agregado fino que de agregado grueso en la mezcla y grandes cantidades de cemento.

Por otra parte, los valores de contracción por secado últimos aumentan en las mezclas con cemento y aire incluido (M3 y M4) en comparación con las mezclas testigo, mientras que en las mezclas con sustitución parcial de cemento con ceniza volante (M5 y M6) disminuyen; en cuanto a la combinación de aire y ceniza volante, la contracción por secado última de la mezcla M7 aumentó 1%, mientras que para la mezcla M8 redujo 6%. Aunque se tienen variaciones en la contracción por secado última con la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, éstas son poco significativas, teniendo una contracción última promedio de 1137×10^{-6} .

Este hecho se puede ver con mayor claridad en la gráfica de barras de la figura 4.22, donde se comparan los valores de contracción por secado últimos estimados para cada mezcla.

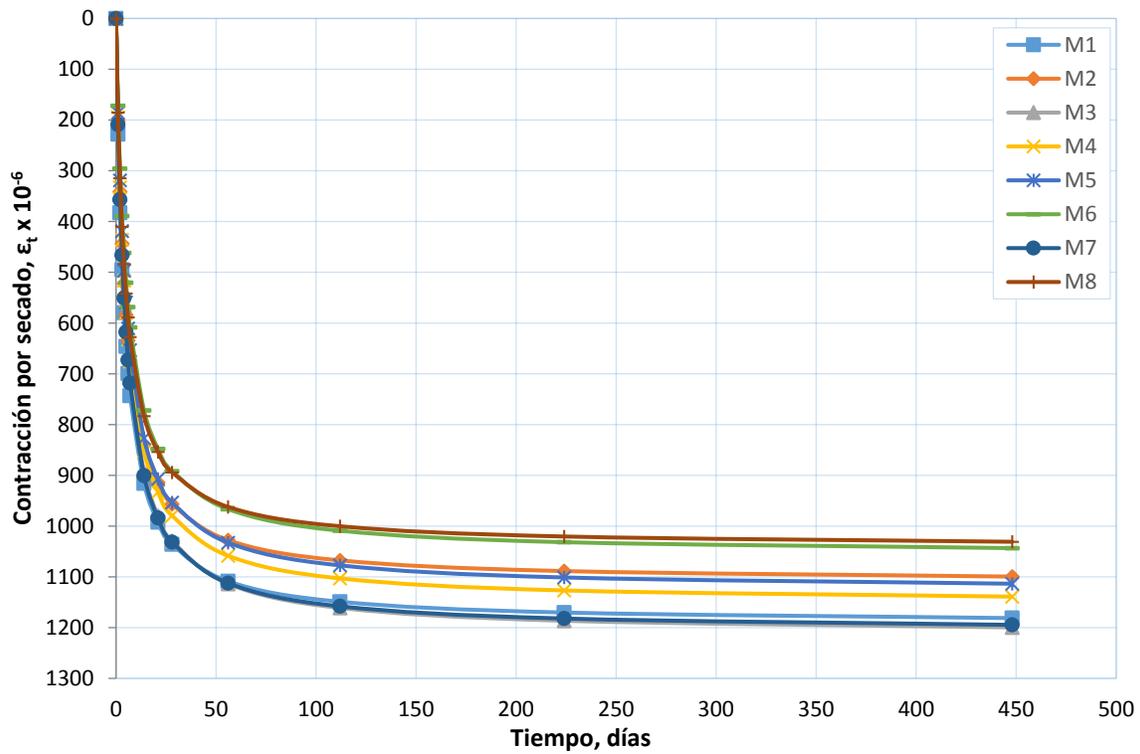


Figura 4.21 Variación de la contracción por secado con el tiempo

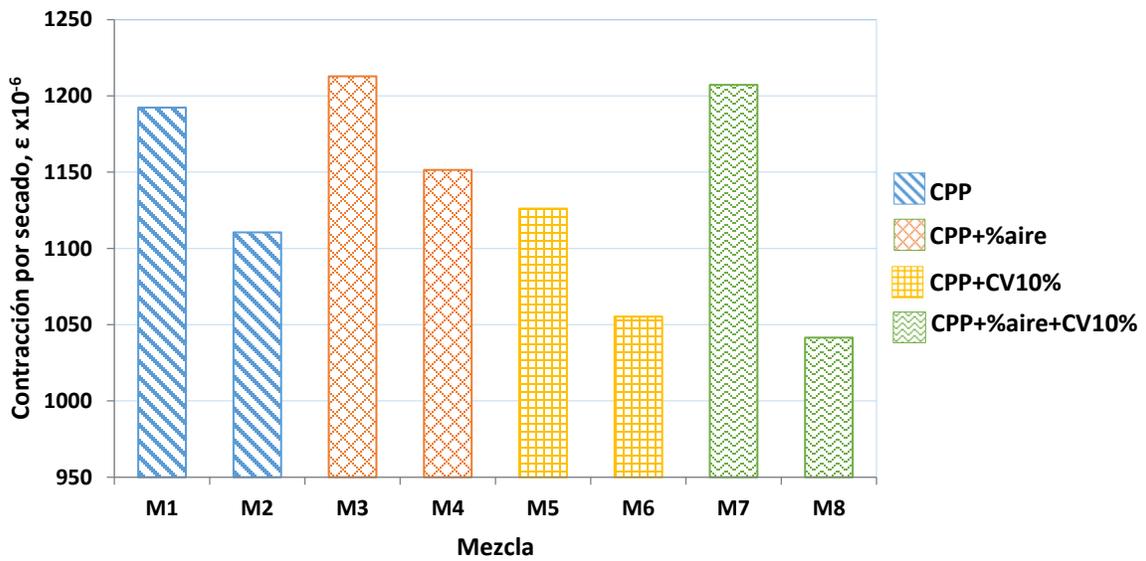


Figura 4.22 Comparativa de los valores de contracción por secado últimos de las mezclas en estudio.

4.3 EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AIRE Y CENIZA VOLANTE A LA MEZCLA

Los efectos asociados a la incorporación de algunos materiales a la mezcla de concreto (adiciones minerales, aire incluido, fibras, entre otros) se encuentran documentados en la literatura; su grado de influencia depende de la calidad de los materiales, del diseño de mezcla y por ende, de las condiciones particulares de cada obra en la que se requiera el concreto. En esta investigación, se estudia la influencia de incorporar aire incluido, ceniza volante y una combinación de ambos en mezclas de concreto lanzado por vía húmeda.

En estado fresco, añadir aire a la mezcla proporciona una mayor fluidez a la misma y reduce su peso volumétrico; por su parte, la ceniza volante reduce el contenido de aire y la fluidez de la mezcla, siendo necesario un mayor consumo de aditivo para incrementar el revenimiento.

En ensayos no destructivos, la presencia de aire incluido se traduce en valores de número de rebote bajos que subestiman aún más la resistencia a compresión real del concreto; también, las burbujas de aire incluido en el concreto endurecido reducen los valores de VPU. Por su parte, la ceniza no modifica significativamente los valores de estos parámetros.

Por otra parte, los resultados obtenidos de ensayos mecánicos indican que la adición de estos materiales reduce los valores de resistencia a compresión simple, pero no altera significativamente los valores de módulo de elasticidad, relación de Poisson, deformación unitaria máxima y de resistencia a tensión por compresión diametral a las diferentes edades de ensayo.

En cuanto a la durabilidad, los resultados obtenidos del ensayo de AAH y VVP parecen mostrar una influencia negativa en la determinación de estos parámetros, algo similar ocurre con los resultados del ensayo de absorción capilar; sin embargo, considerando las observaciones hechas en los incisos 4.2.6 y 4.2.7 relativos a estos ensayos, estos resultados son poco consistentes.

Por otra parte, los resultados del ensayo ERPC muestran que la presencia de estos materiales en cantidades adecuadas en la mezcla, reduce la cantidad de carga (Coulombs) que pasa en una muestra determinada; también, su presencia no modifica significativamente el valor de contracción por secado última.

Por lo tanto, la adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla es benéfica en cuanto a durabilidad se refiere; sin embargo, se debe tener presente que ambos materiales reducen los valores de resistencia a compresión simple, hecho que debe ser tomado en cuenta en el diseño de mezcla.

5. RELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS

En este capítulo se muestran relaciones obtenidas con los resultados de algunos de los ensayos cuyo análisis se muestra en el capítulo 4. Se muestran las curvas que relacionan los resultados de los ensayos no destructivos (NR y VPU) con sus correspondientes valores de resistencia a compresión simple y entre ellos. También, se muestran las relaciones obtenidas entre los ensayos de AAH y ERPC.

5.1 NÚMERO DE REBOTE Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Con los resultados de número de rebote obtenidos de los ensayos con el esclerómetro y los resultados de resistencia a compresión simple se obtuvieron las curvas y sus ecuaciones que relacionan estos parámetros a 28 y 91 días de edad. Para determinar estas curvas, se realizaron diversos tipos de ajustes con la finalidad de encontrar la mejor correlación; estos ajustes se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.1 Resultados de número de rebote y resistencia a compresión simple a 28 y 91 días

Mezcla	28 días de edad		91 días de edad	
	Número de Rebote, 1	f'c, kg/cm ²	Número de Rebote, 1	f'c, kg/cm ²
M1	27.3	349	29.0	424
M2	31.2	462	32.9	537
M3	27.0	332	27.6	384
M4	27.3	391	27.8	437
M5	26.8	346	26.7	391
M6	29.3	425	31.1	503
M7	22.3	282	22.7	324
M8	28.5	412	29.0	463

Tabla 5.2 Tipos de ajustes realizados entre número de rebote y resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

28 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.95	$f'c = 73.508e^{0.0589NR}$
Lineal	0.94	$f'c = 21.344NR - 211.41$
Logarítmico	0.93	$f'c = 554.48 \ln(NR) - 1459.9$
Potencial	0.94	$f'c = 2.2809(NR)^{1.5386}$
91 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.97	$f'c = 100.84e^{0.051NR}$
Lineal	0.96	$f'c = 21.537NR - 177.66$
Logarítmico	0.95	$f'c = 585.15 \ln(NR) - 1521.1$
Potencial	0.96	$f'c = 4.0754(NR)^{1.3938}$

En la tabla 5.2 se observa que los coeficientes de correlación de cada tipo de ajuste realizado son mayores a 0.9, lo cual es un indicativo de una buena relación entre ambos parámetros; además, estos coeficientes no difieren significativamente. Para efectos prácticos, se ha decidido tomar el ajuste lineal tanto a 28 como a 91 días de edad. Las gráficas de las figura 5.1 y 5.3 muestran la tendencia de estos parámetros a 28 y 91 días de edad, respectivamente; las gráficas de las figuras 5.2 y 5.4 muestran las curvas que relacionan estos parámetros, las cuales fueron determinadas a partir de las ecuaciones mostradas en las figuras 5.1 y 5.3 para diferentes valores de número de rebote a 28 y 91 días de edad, respectivamente.

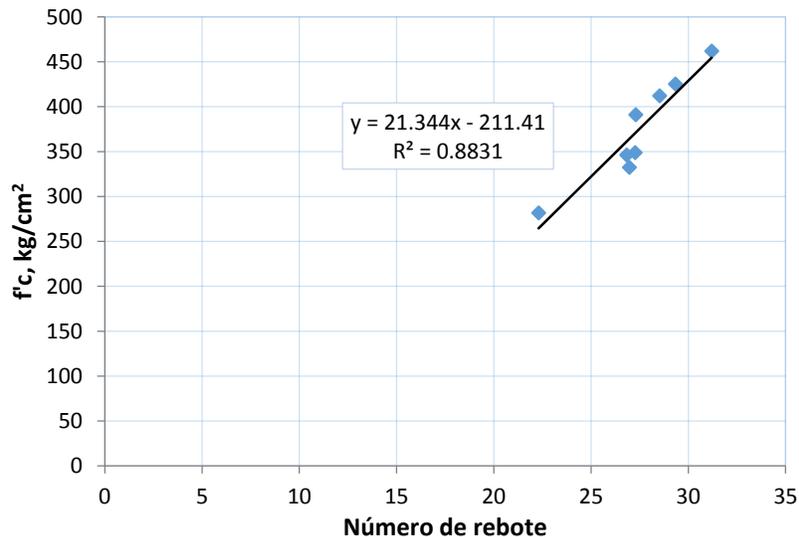


Figura 5.1 Tendencia entre número de rebote y resistencia a compresión simple a 28 días de edad

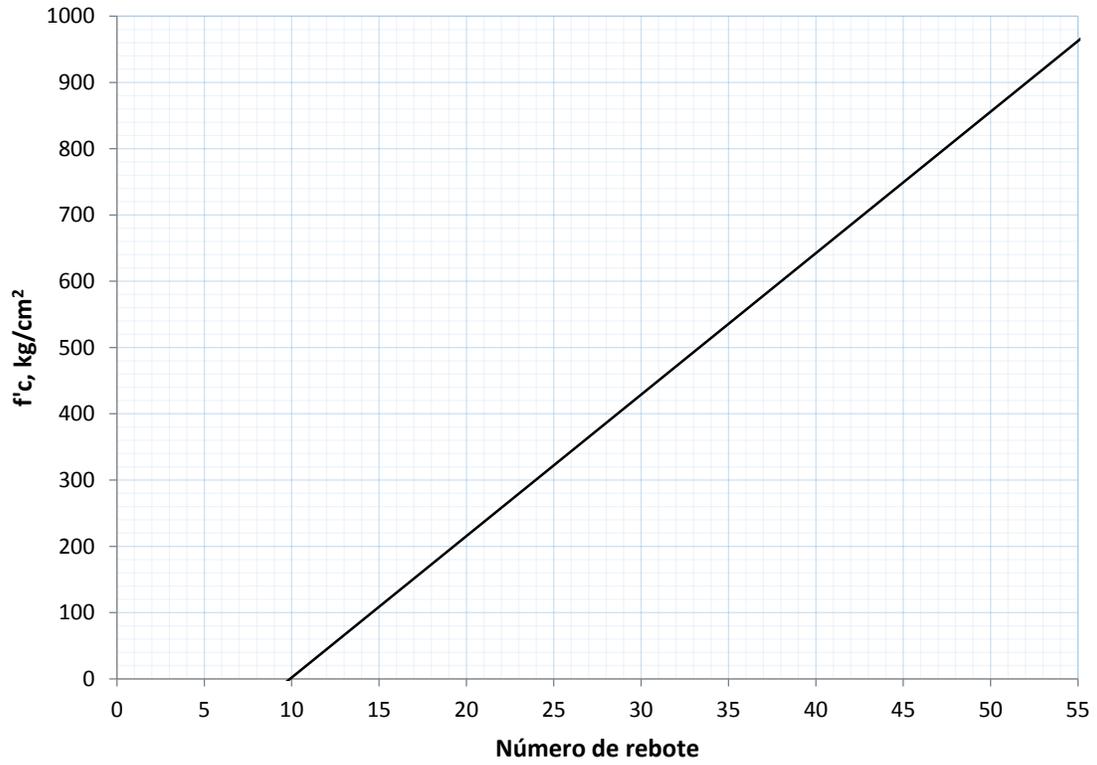


Figura 5.2 Relación entre el número de rebote y la resistencia a compresión simple a 28 días de edad

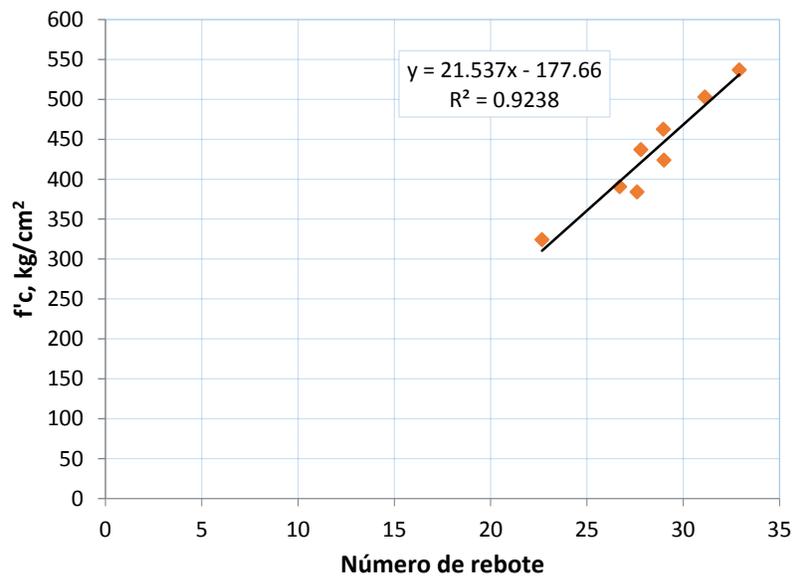


Figura 5.3 Tendencia entre número de rebote y resistencia a compresión simple a 91 días de edad

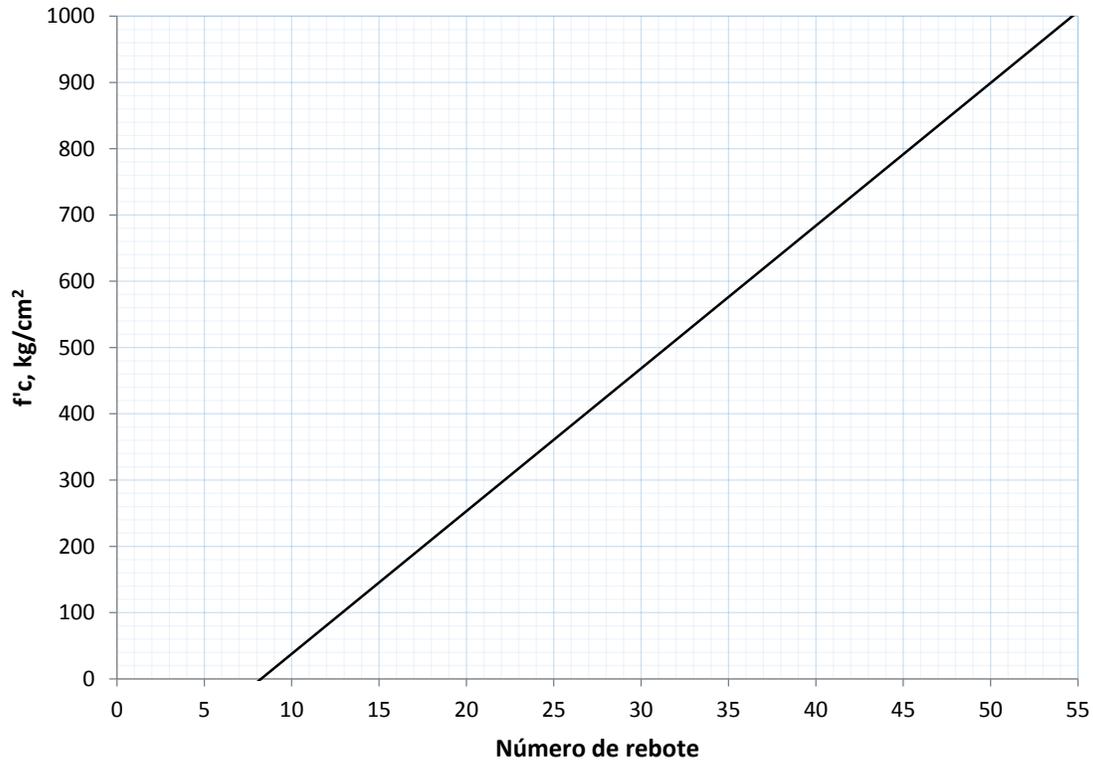


Figura 5.4 Relación entre el número de rebote y la resistencia a compresión simple a 91 días de edad

En este análisis también se incluye una gráfica similar a las de las figuras 5.2 y 5.4, la cual involucra los números de rebote determinados tanto a 28 como a 91 días de edad, con sus correspondientes valores de resistencia a compresión simple; la razón de hacer este análisis obedece a que cuando se verifica la uniformidad de una estructura mediante el ensaye con el esclerómetro, no siempre es posible saber la edad que tiene el concreto de la estructura en turno.

Los tipos de ajuste analizados se muestran en la tabla 5.3, la gráfica con la tendencia de estos parámetros se muestra en la figura 5.5 y la relación que existe entre ambos se muestra en la gráfica de la figura 5.6. Al igual que en los análisis a las diferentes edades de ensaye, se eligió el ajuste de tipo lineal.

Tabla 5.3 Tipos de ajustes realizados entre número de rebote y resistencia a compresión simple involucrando 28 y 91 días de edad

28 y 91 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.92	$f'c = 80.675e^{0.0572NR}$
Lineal	0.92	$f'c = 22.662NR - 228.59$
Logarítmico	0.90	$f'c = 603.34 \ln(NR) - 1601.7$
Potencial	0.91	$f'c = 2.4336(NR)^{1.5337}$

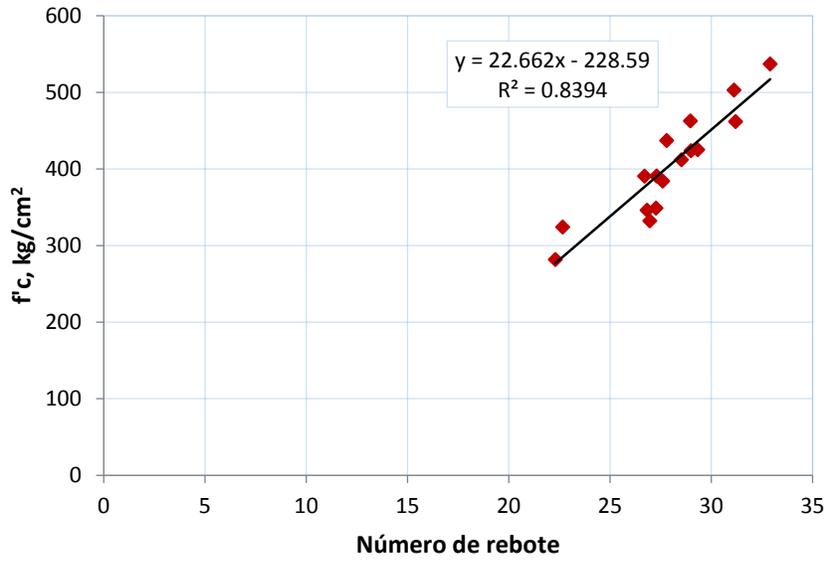


Figura 5.5 Tendencia entre el número de rebote y la resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

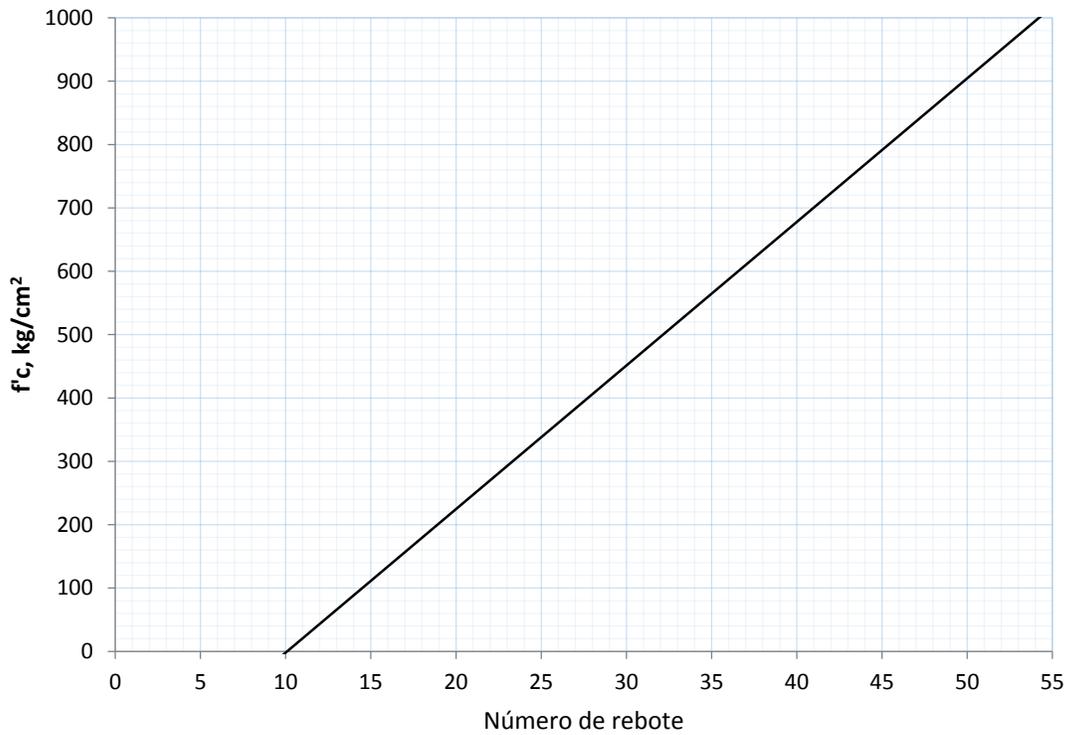


Figura 5.6 Relación entre el número de rebote y la resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

5.2 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Al igual que en el tema anterior, con los resultados obtenidos de VPU y los resultados de resistencia a compresión simple se obtuvieron las curvas y sus ecuaciones que relacionan estos parámetros a 28 y 91 días de edad. Para determinar estas curvas, se realizaron diversos tipos de ajustes con la finalidad de encontrar la mejor correlación; estos ajustes se muestran en la tabla 5.5.

Tabla 5.4 Resultados de VPU y resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

Mezcla	28 días de edad		91 días de edad	
	VPU, m/s	f'c, kg/cm2	VPU, m/s	f'c, kg/cm2
M1	3864.1	349	4068.7	424
M2	4023.0	462	4165.1	537
M3	3819.3	332	3975.3	384
M4	3861.8	391	3984.5	437
M5	3895.6	346	4028.1	391
M6	4005.2	425	4114.2	503
M7	3697.7	282	3876.2	324
M8	3925.8	412	4070.0	463

Tabla 5.5 Tipos de ajustes realizados entre VPU y resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

28 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.94	$f'c = 1.3685e^{0.0014VPU}$
Lineal	0.94	$f'c = 0.5244VPU - 1663.3$
Logarítmico	0.94	$f'c = 2024.7 \ln(VPU) - 16359$
Potencial	0.94	$f'c = (4 \times 10^{-18})VPU^{5.5716}$
91 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.93	$f'c = 0.5165e^{0.0017VPU}$
Lineal	0.93	$f'c = 0.7039VPU - 2407.4$
Logarítmico	0.93	$f'c = 2825.1 \ln(VPU) - 23022$
Potencial	0.93	$f'c = (3 \times 10^{-22})VPU^{6.691}$

En la tabla 5.5 se observa que los coeficientes de correlación de cada tipo de ajuste realizado son mayores a 0.9, lo cual es un indicativo de una buena relación entre ambos parámetros; además, estos coeficientes tienen el mismo valor para cada edad de ensaye (0.94 a 28 días de edad y 0.93 para 91 días de edad). Al igual que en el tema anterior, se ha decidido tomar el ajuste lineal tanto a 28 como a 91 días de edad. Las gráficas de las figura 5.7 y 5.9 muestran la tendencia de estos parámetros a 28 y 91 días de edad, respectivamente; las gráficas de las figuras 5.8 y 5.10 muestran las curvas que relacionan estos parámetros, las cuales fueron determinadas a partir de las ecuaciones mostradas en las figuras 5.7 y 5.9 para diferentes valores de VPU a 28 y 91 días de edad, respectivamente.

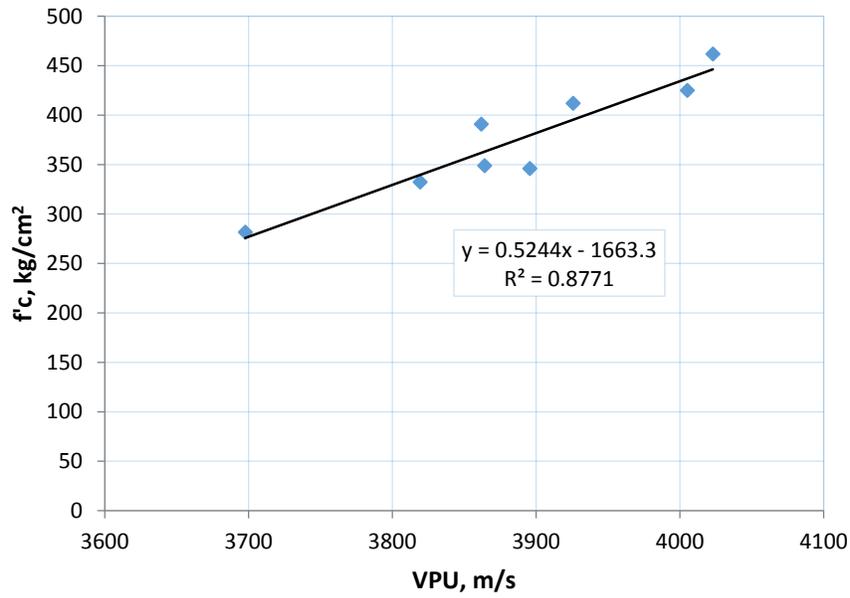


Figura 5.7 Tendencia entre la VPU y la resistencia a compresión simple a 28 días de edad

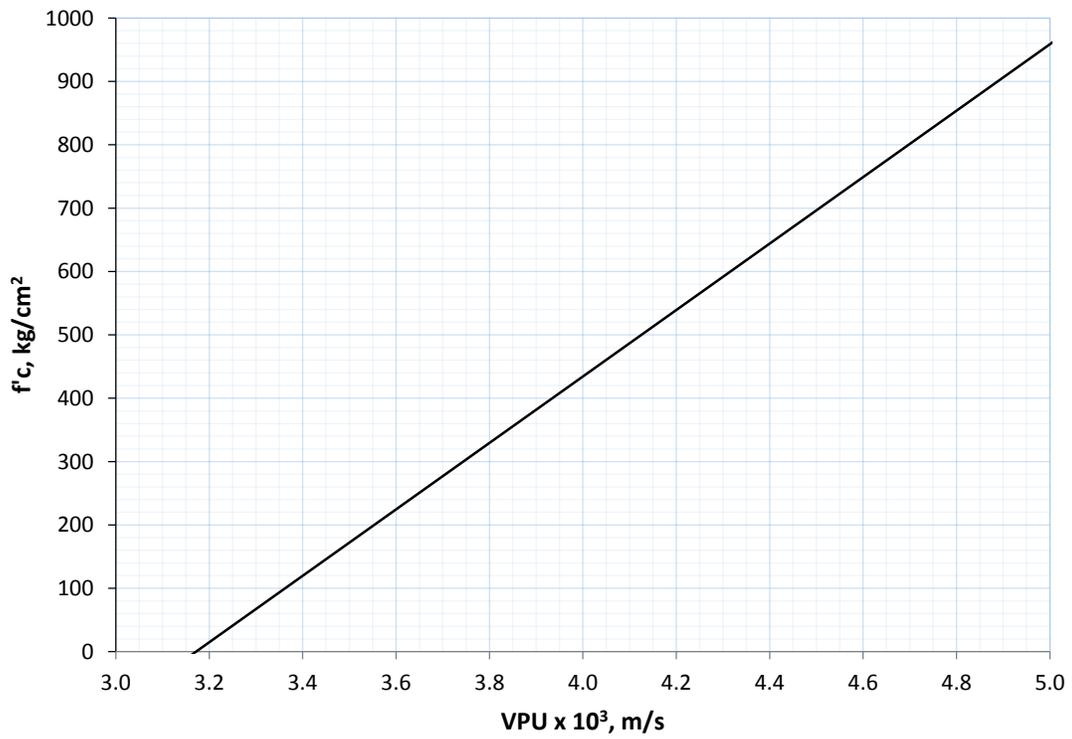


Figura 5.8 Relación entre la VPU y resistencia a compresión simple a 28 días de edad

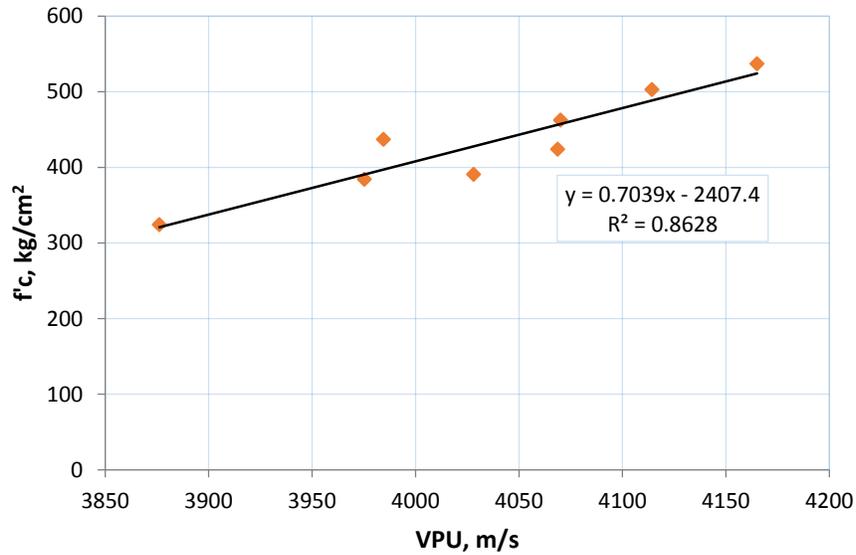


Figura 5.9 Tendencia entre VPU y resistencia a compresión simple a 91 días de edad

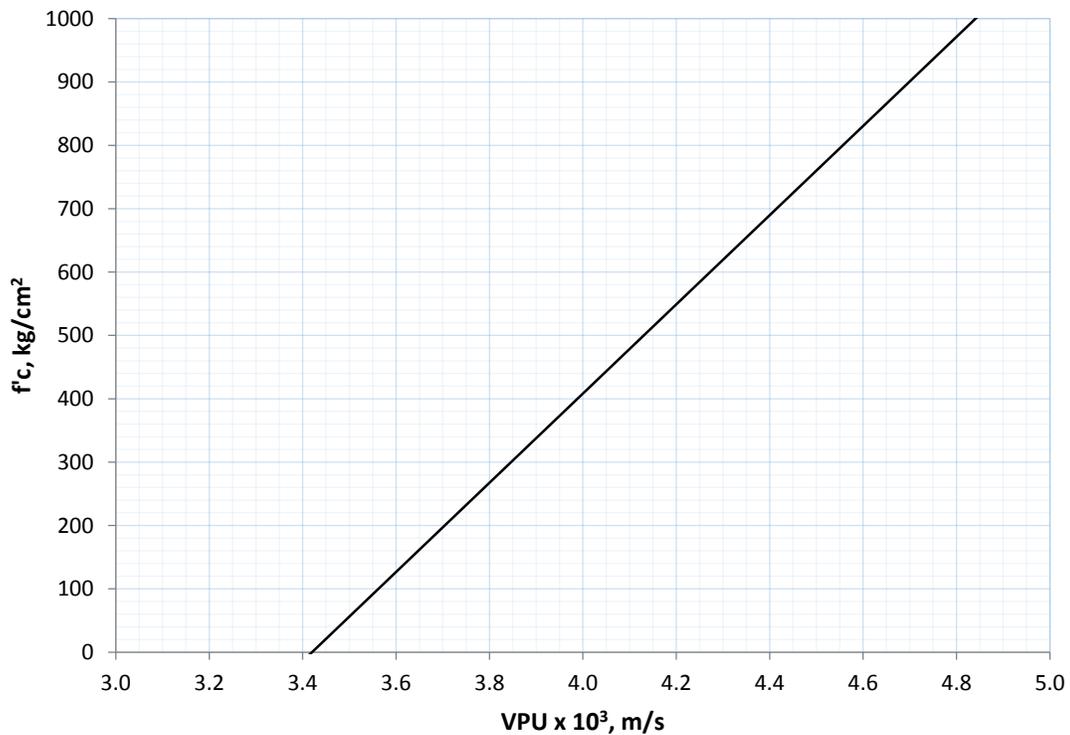


Figura 5.10 Relación entre VPU y resistencia a compresión simple a 91 días de edad

Al igual que en el ensaye con el esclerómetro, se elaboró una gráfica similar a las de las figuras 5.8 y 5.10, la cual involucra las VPU determinadas tanto a 28 como a 91 días de edad, con sus correspondientes valores de resistencia a compresión simple. Los tipos de ajuste analizados se muestran en la tabla 5.6, la gráfica con la tendencia de estos parámetros se muestra en la figura 5.11 y la relación que existe entre

ambos se muestra en la gráfica de la figura 5.12. Al igual que en los análisis a las diferentes edades de ensaye, se eligió el ajuste de tipo lineal.

Tabla 5.6 Tipos de ajustes realizados entre VPU y resistencia a compresión simple involucrando 28 y 91 días de edad

28 y 91 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.93	$f'c = 2.2349e^{0.0013VPU}$
Lineal	0.92	$f'c = 0.5169VPU - 1643.4$
Logarítmico	0.92	$f'c = 2030.2 \ln(VPU) - 16414$
Potencial	0.93	$f'c = (1 \times 10^{-16})VPU^{5.1495}$

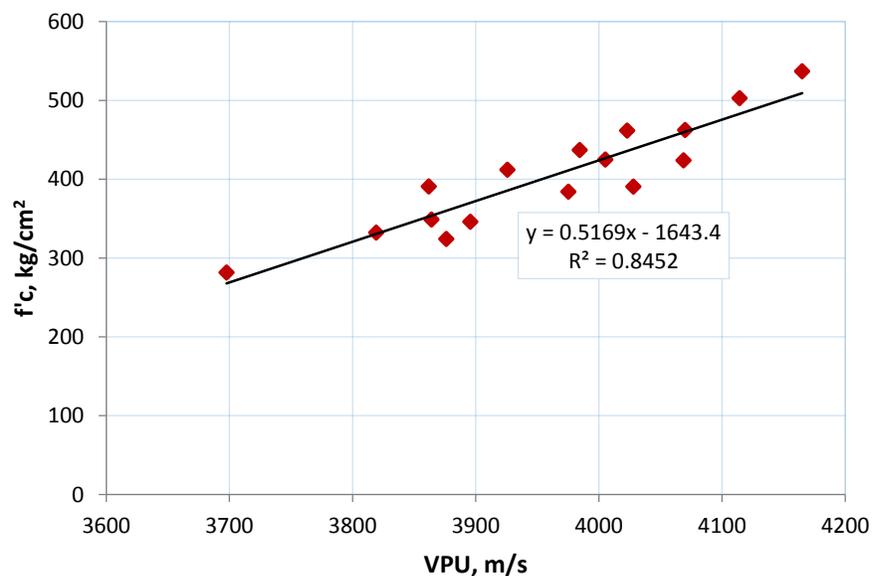


Figura 5.11 Tendencia entre la VPU y la resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

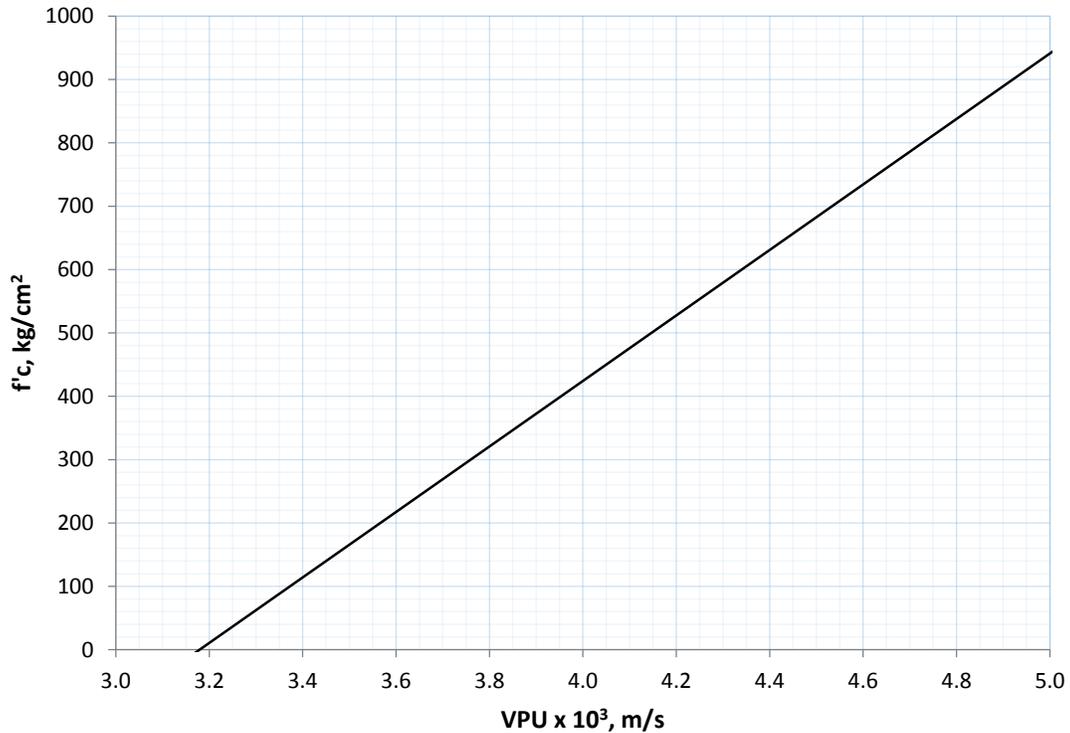


Figura 5.12 Relación entre VPU y resistencia a compresión simple a 28 y 91 días de edad

5.3 NÚMERO DE REBOTE Y VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

Un análisis similar al realizado en los temas 5.1 y 5.2 se presenta en este tema, donde los parámetros relacionados son el número de rebote y su correspondiente VPU a 28 y 91 días de edad. Los tipos de ajuste realizados se muestran en la tabla 5.8.

Tabla 5.7 Resultados de número de rebote y VPU a 28 y 91 días

Mezcla	28 días de edad		91 días de edad	
	Número de Rebote, 1	VPU, m/s	Número de Rebote, 1	VPU, m/s
M1	27.3	3864.1	29.0	4068.7
M2	31.2	4023.0	32.9	4165.1
M3	27.0	3819.3	27.6	3975.3
M4	27.3	3861.8	27.8	3984.5
M5	26.8	3895.6	26.7	4028.1
M6	29.3	4005.2	31.1	4114.2
M7	22.3	3697.7	22.7	3876.2
M8	28.5	3925.8	29.0	4070.0

Tabla 5.8 Tipos de ajustes realizados entre número de rebote y VPU a 28 y 91 días de edad

28 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.96	$VPU = 2947.2e^{0.0101NR}$
Lineal	0.96	$VPU = 38.833NR + 2820$
Logarítmico	0.95	$VPU = 1016.7 \ln(NR) + 522.34$
Potencial	0.95	$VPU = 1623.7(NR)^{0.2637}$
91 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.96	$VPU = 3304.7e^{0.0071NR}$
Lineal	0.96	$VPU = 28.29NR + 3233.4$
Logarítmico	0.95	$VPU = 773.7 \ln(NR) + 1451.7$
Potencial	0.95	$VPU = 2120.3(NR)^{0.1926}$

En la tabla 5.8 se observa que los coeficientes de correlación, tanto para 28 como para 91 días de edad, se ubican entre 0.95 y 0.96; al igual que en los casos anteriores, se ha decidido tomar el ajuste lineal para ambas edades de ensaye. Las gráficas de las figuras 5.13 y 5.15 muestran la tendencia de estos parámetros a 28 y 91 días de edad, respectivamente; las gráficas de las figuras 5.14 y 5.16 muestran las curvas que relacionan estos parámetros, las cuales fueron determinadas a partir de las ecuaciones mostradas en las figuras 5.13 y 5.15 para diferentes valores de número de rebote a 28 y 91 días de edad, respectivamente.

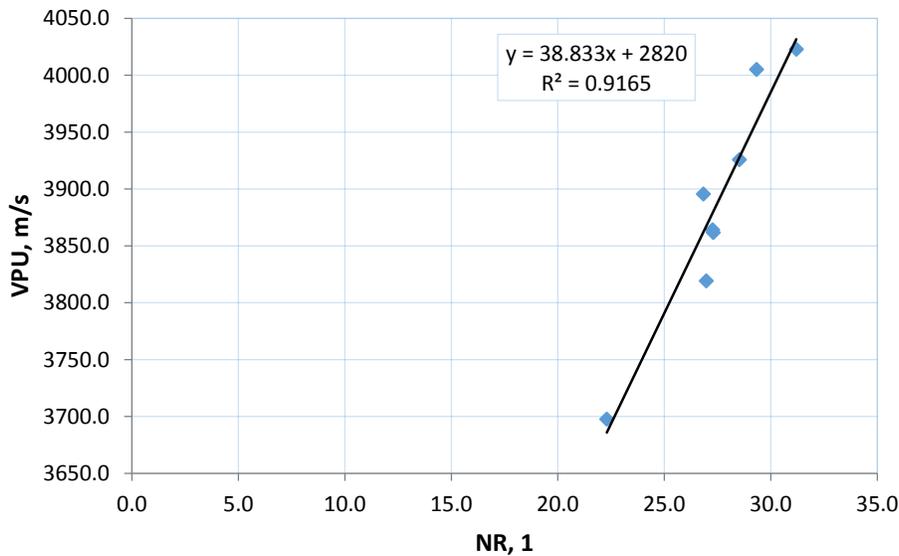


Figura 5.13 Tendencia entre el número de rebote y la VPU a 28 días de edad

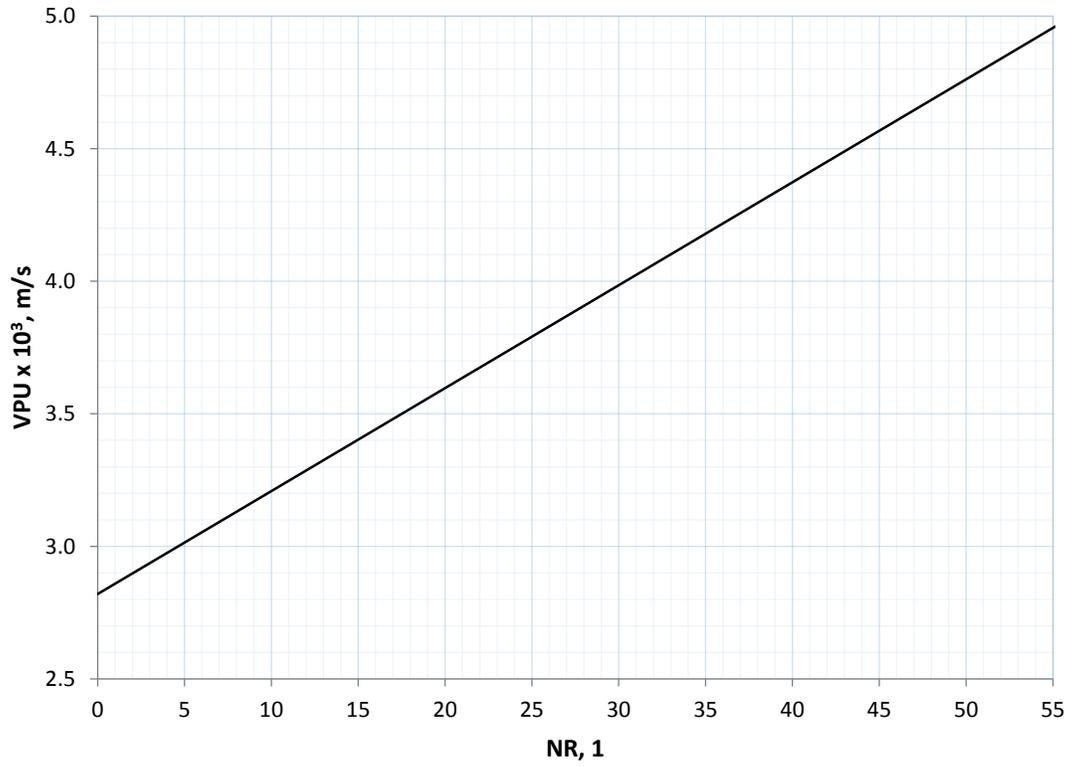


Figura 5.14 Relación entre el número de rebote y la VPU a 28 días de edad

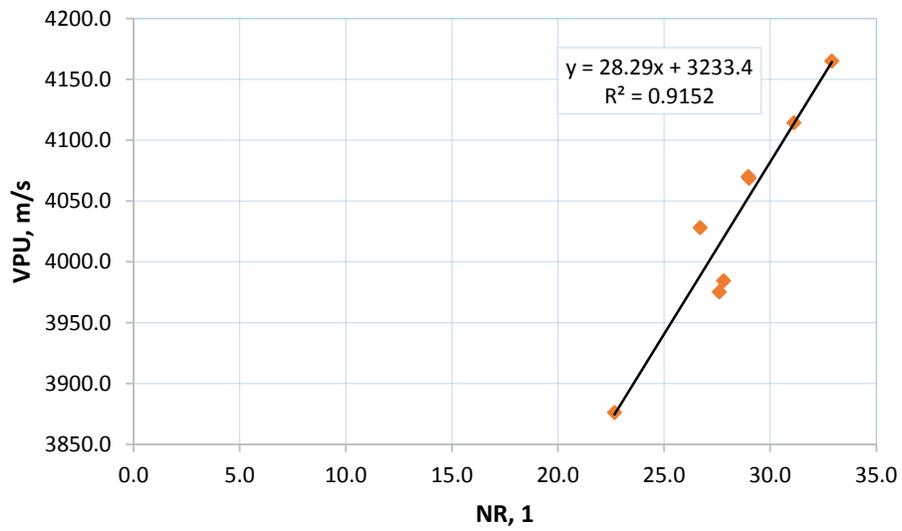


Figura 5.15 Tendencia entre el número de rebote y la VPU a 91 días de edad

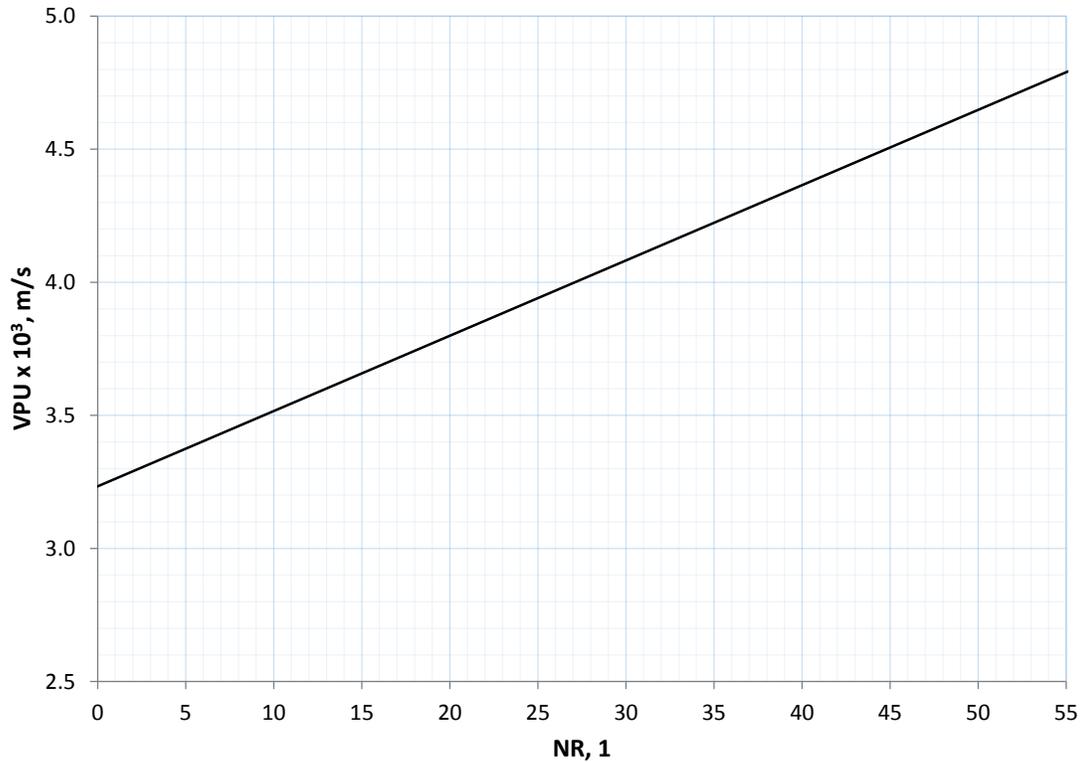


Figura 5.16 Relación entre el número de rebote y la VPU a 91 días de edad

Al igual que en los incisos anteriores, se elaboró una curva que involucra las VPU determinadas tanto a 28 como a 91 días de edad, con sus correspondientes valores de número de rebote. Los tipos de ajuste analizados se muestran en la tabla 5.9, la gráfica con la tendencia de estos parámetros se muestra en la figura 5.17 y la relación que existe entre ambos se muestra en la gráfica de la figura 5.18. Los coeficientes de correlación son menores en comparación con los obtenidos para cada edad de ensaye, siendo los ajustes de tipo exponencial y lineal los que mejor correlación tienen ($R=0.83$). Para efectos prácticos, se ha elegido el ajuste de tipo lineal.

Tabla 5.9 Tipos de ajustes realizados entre VPU y número de rebote involucrando 28 y 91 días de edad

28 y 91 días de edad		
Tipo de ajuste	R	Expresión
Exponencial	0.83	$VPU = 3060.6e^{0.0092NR}$
Lineal	0.83	$VPU = 36.349NR + 2946.6$
Logarítmico	0.82	$VPU = 973.73 \ln(NR) + 724.2$
Potencial	0.82	$VPU = 1739.6NR^{0.2474}$

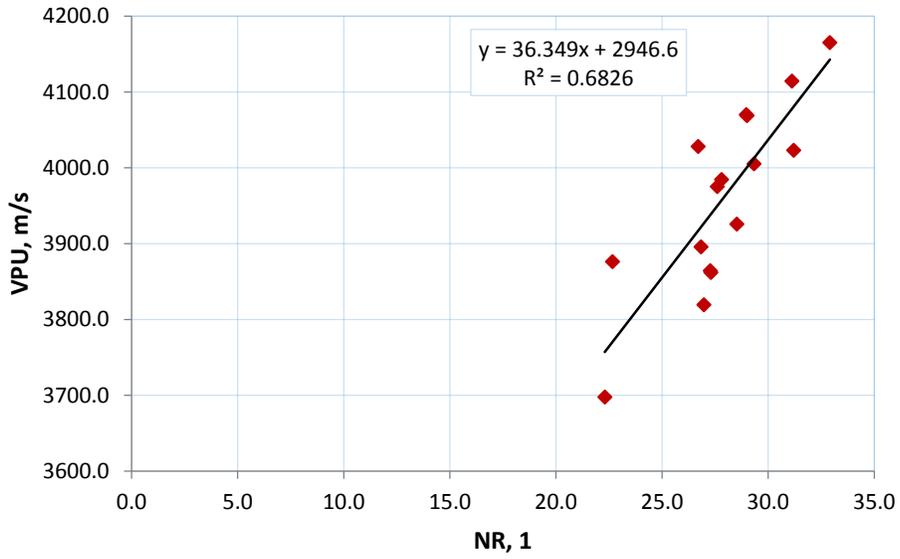


Figura 5.17 Tendencia entre el número de rebote y la VPU a 28 y 91 días de edad

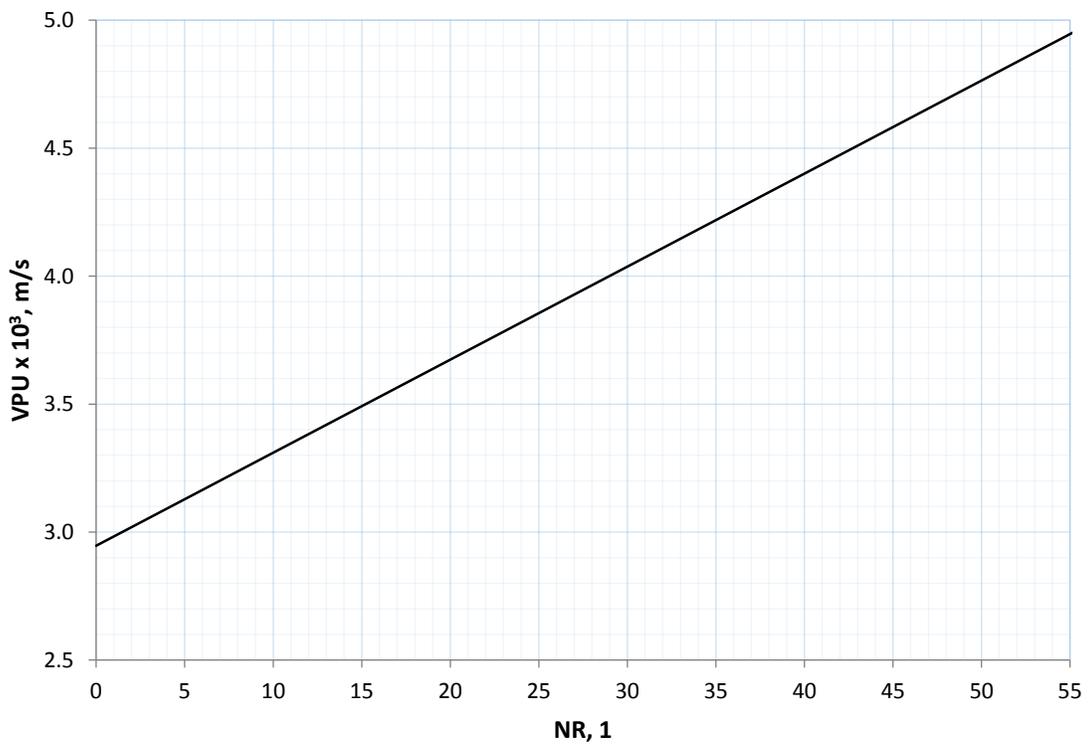


Figura 5.18 Relación entre el número de rebote y la VPU a 28 y 91 días de edad

5.4 RELACIÓN ENTRE ABSORCIÓN EN AGUA HIRVIENDO Y VOLUMEN DE VACÍOS PERMEABLES

Los resultados del ensayo de AAH y VVP (ver tabla 5.10) se encuentran graficados en las figuras 5.19 y 5.20, a 28 y 91 días de edad, respectivamente; en ellas se observa que, como lo indica Power, 2015, hay una relación directa entre estos parámetros. Una explicación más detallada sobre la correlación que existe entre la AAH y el VVP se encuentra en Power, 2015.

Tabla 5.10 Resultados del ensayo de AAH y VVP a 28 y 91 días de edad

Mezcla	Relación a/c	28 días de edad		91 días de edad	
		AAH, %	VVP, %	AAH, %	VVP, %
M1	0.49	11.0	21.5	11.8	23.2
M2	0.39	8.8	17.7	10.3	20.8
M3	0.49	11.4	22.2	11.9	22.8
M4	0.39	11.5	21.4	11.5	21.5
M5	0.49	11.3	22.0	12.2	23.6
M6	0.39	9.8	19.3	10.9	21.4
M7	0.49	17.4	32	12.9	24.2
M8	0.39	12.2	23.6	11.3	21.8

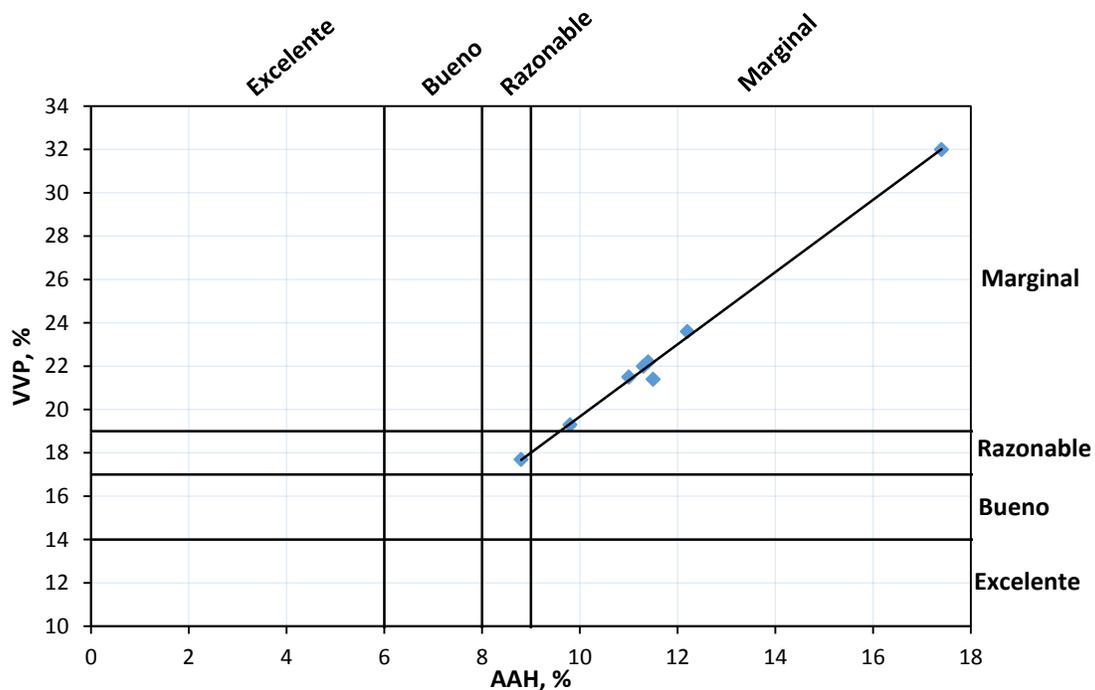


Figura 5.19 Relación entre AAH y VVP a 28 días de edad.

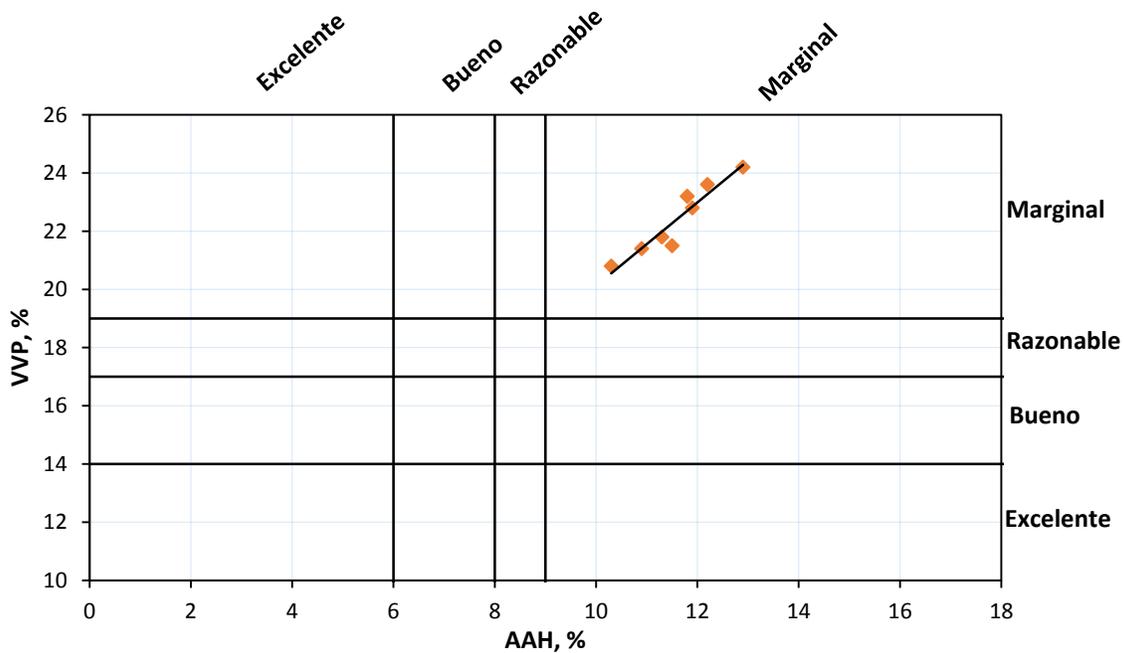


Figura 5.20 Relación entre AAH y VVP a 91 días de edad

En general, en las gráficas 5.19 y 5.20 se observa que ambos criterios clasifican de la misma forma la calidad del concreto; por ejemplo, en la gráfica 5.19, a 28 días de edad, se localiza un punto que pertenece a la mezcla M2, el cual tiene una clasificación de la calidad del concreto razonable tanto para el criterio de AAH (8.8%) como para el de VVP (17.7%), lo cual verifica lo establecido en la tabla 4.15 (capítulo 4, inciso 4.2.6). Los demás puntos, pertenecientes al resto de las mezclas en estudio, tanto a 28 como a 91 días de edad, clasifican la calidad del concreto como marginal, tanto para el criterio de AAH como para el de VVP.

5.5 RELACIÓN ENTRE ABSORCIÓN EN AGUA HIRVIENDO Y EL ENSAYE RÁPIDO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS

En el capítulo 1 se habla sobre los criterios que normalmente son utilizados para estimar la durabilidad del concreto lanzado, el cual involucra la realización de los ensayos de AAH y el ERPC; también, se describe la problemática que presentan estos ensayos al tratar de correlacionarlos. En esta investigación, los resultados obtenidos de estos ensayos (ver tabla 5.11) fueron graficados de forma similar a la realizada por Bolduc et. al., (2010) para cada edad de ensaye; estas gráficas se muestran en las figuras 5.21 y 5.22 para las edades de 28 y 91 días de edad, respectivamente.

Tabla 5.11 Resultados de los ensayos de AAH y ERPC a 28 y 91 días de edad

Mezcla	Relación a/c	28 días de edad		91 días de edad	
		AAH, %	ERPC, C	AAH, %	ERPC, C
M1	0.49	11.0	6774.4	11.8	2573.1
M2	0.39	8.8	6348.5	10.3	1745.0
M3	0.49	11.4	6341.3	11.9	2148.5
M4	0.39	11.5	5540.2	11.5	1743.8
M5	0.49	11.3	6026.6	12.2	2090.4
M6	0.39	9.8	4394.1	10.9	1450.3
M7	0.49	17.4	5165.7	12.9	2185.2
M8	0.39	12.2	4147.2	11.3	1523.8

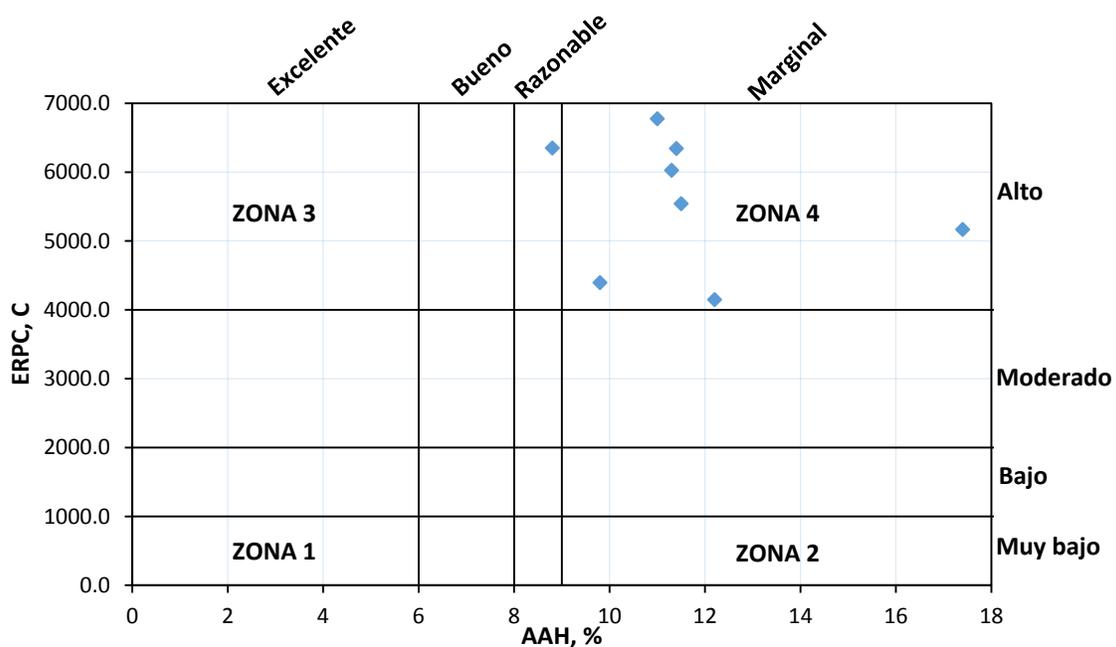


Figura 5.21 Relación entre AAH y ERPC a 28 días de edad

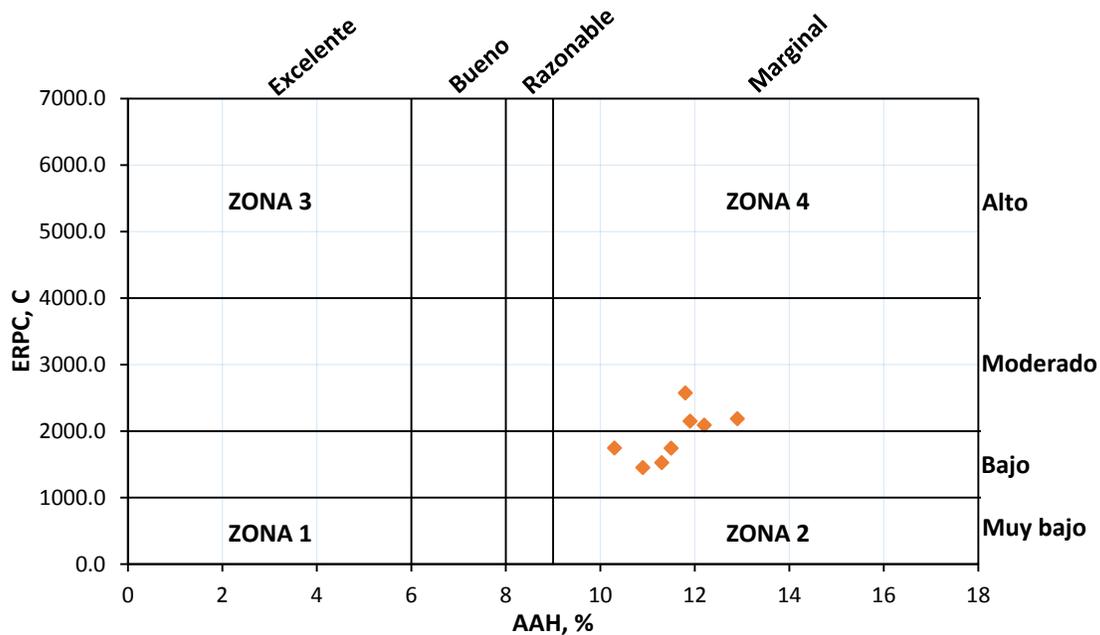


Figura 5.22 Relación entre AAH y ERPC a 91 días de edad

A 28 días de edad, la dispersión de los datos es muy grande, además, todos los datos tienden a caer en la zona 4, donde la AAH tiene una calidad marginal y el ERPC tiene una clasificación alta; la mezcla M2 tiene un valor de AAH razonable igual a 8.8%, pero el ERPC arroja una carga de 6348.5 Coulombs que atraviesan, por lo que sigue clasificándose, de acuerdo a este criterio, como alto.

A 91 días de edad, los valores de AAH siguen clasificando la calidad de los concretos en estudio como marginal, incluso la mezcla M8, cuya calidad a 28 días de edad se clasificó, de acuerdo con este criterio, como razonable; esto hace que los puntos en la gráfica no se muevan de la franja que clasifica la calidad del concreto como marginal. Por otra parte, la reducción en el valor de la carga que pasa en el ERPC hace bajar estos puntos en la gráfica sobre la franja antes mencionada, hasta llegar a colocarlos en las zonas donde la clasificación es moderada para los concretos con relación a/c de 0.49 y baja para los concreto con relación a/c de 0.39 para la clasificación del ERPC.

5.6 RELACIÓN ENTRE VOLUMEN DE VACÍOS PERMEABLES Y EL ENSAYE RÁPIDO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS

Al igual que en el tema anterior, se relacionaron los resultados obtenidos de VVP y del ensaye ERPC (ver tabla 5.12) de las mezclas en estudio para verificar la relación que estos tienen. Para ello, se utilizaron graficas similares a las de las figuras 5.21 y 5.22, mostrando los límites que se establecen para el VVP en lugar de los establecidos para la AAH; éstas gráficas se muestran en las figuras 5.23 y 5.24 para las edades de 28 y 91 días de edad, respectivamente.

Tabla 5.12 Resultados de los ensayos de VVP y ERPC a 28 y 91 días de edad

Mezcla	Relación a/c	28 días de edad		91 días de edad	
		VVP, %	ERPC, C	AAH, %	ERPC, C
M1	0.49	21.5	6774.4	23.2	2573.1
M2	0.39	17.7	6348.5	20.8	1745.0
M3	0.49	22.2	6341.3	22.8	2148.5
M4	0.39	21.4	5540.2	21.5	1743.8
M5	0.49	22.0	6026.6	23.6	2090.4
M6	0.39	19.3	4394.1	21.4	1450.3
M7	0.49	32.0	5165.7	24.2	2185.2
M8	0.39	23.6	4147.2	21.8	1523.8

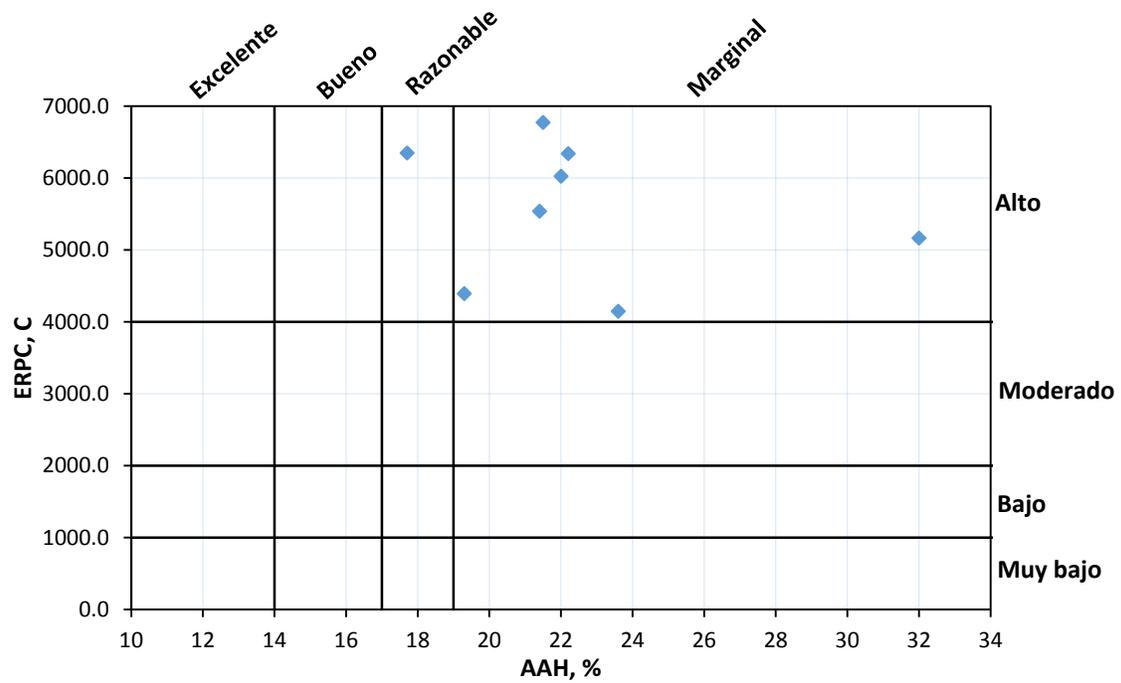


Figura 5.23 Relación entre VVP y el ERPC a 28 días de edad

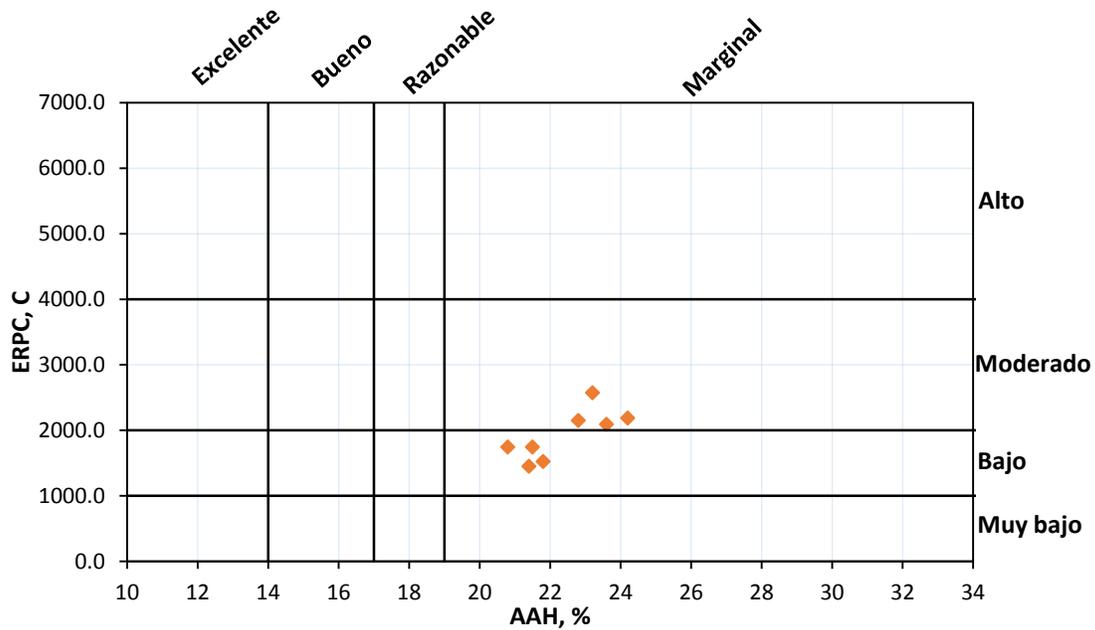


Figura 5.24 Relación entre VVP y el ERPC a 91 días de edad

En las gráficas de las figuras 5.23 y 5.24 se observa que, tanto a 28 como a 91 días de edad, la dispersión de los datos es muy similar a la que se tiene al relacionar la AAH con el ensaye ERPC a esas edades. Esto es indicativo de la relación directa que tienen la AAH y el VVP y por ende, al intentar relacionar ambos con el ensaye ERPC, se obtienen gráficas similares.

A 28 días de edad, todos los datos tienden a caer en la zona 4, donde el VVP tiene una calidad marginal y el ERPC tiene una clasificación alta; la mezcla M2 tiene un valor de VVP igual a 17.7%, clasificando la calidad de este concreto como razonable, tal y como ocurre cuando se clasifica con base en su AAH. También el ERPC arroja una carga de 6348.5 Coulombs que atraviesan, por lo que sigue clasificándose, de acuerdo con este criterio, como alto, tal y como ocurre en la gráfica 5.21.

A 91 días de edad, al igual que los valores de AAH en la figura 5.22, los valores de VVP siguen clasificando la calidad de los concretos en estudio como marginal, incluso la mezcla M8, cuya calidad a 28 días de edad se clasificó, de acuerdo con este criterio, como razonable; la reducción en el valor de la carga que pasa en el ERPC hace que la gráfica 5.24 tenga el mismo comportamiento que la gráfica 5.22.

CONCLUSIONES

A la luz de los resultados obtenidos de esta investigación, tanto de la parte teórica como del programa de laboratorio implementado, se puede concluir lo siguiente:

- Se cumplió con el objetivo planteado al inicio de este trabajo; el programa experimental permitió el diseño, elaboración y caracterización de las mezclas de concreto lanzado en estudio; además, se obtuvieron valores de AAH y de ERPC de todas las mezclas, los cuales fueron relacionados entre sí para conocer su interacción. Las mezclas en estudio tienen la mayoría de las propiedades del concreto lanzado establecidas en la literatura.
- El concreto lanzado es un método de colocación de concreto que requiere la implementación de un procedimiento de control de calidad minucioso para asegurar que el producto final funcione como se diseñó y tenga una esperanza de vida útil satisfactoria. Esto se debe a la cantidad de variables que intervienen en el proceso, tales como la calidad de los materiales, equipos de aplicación, operadores de los equipos, procedimientos de ensaye y monitoreo constante de cada fase de colocación del concreto lanzado.
- La habilidad del operador de la boquilla es uno de los aspectos clave para la obtención de un concreto lanzado de buena calidad, es el responsable de la colocación del concreto, debe tener los conocimientos y la técnica de colocación adecuada, para asegurar que la presión de aire sea uniforme para proporcionar una alta velocidad de impacto y por ende, una buena compactación; verifica la consistencia de la mezcla al salir de la boquilla y es capaz de controlar o minimizar el rebote y el exceso de rocío durante la colocación del concreto en la obra. De ahí la importancia que el operador de la boquilla este certificado por el programa ACI CP-606 o alguno similar.
- El procedimiento de control de calidad puede dividirse en dos grupos: control de calidad en obra y control de calidad en laboratorio. En el primero, pueden incluirse ensayos con esclerómetro, ensayos de velocidad de pulso ultrasónico, ensayos de adherencia al sustrato, ensayos de resistencia a la penetración, entre otros. En el segundo grupo pueden incluirse ensayos de resistencia a compresión simple, módulo de elasticidad, resistencia a tensión, ensayos de AAH y VVP, ensayos rápidos de penetración de iones cloruros y ensayos de permeabilidad al agua.
- La velocidad de lanzado es un parámetro clave para la obtención de una buena compactación; los valores de AAH y VVP de las mezclas de este estudio son mayores en comparación con los valores

típicos para una mezcla de concreto lanzado señalados en la literatura, lo cual corrobora la importancia de controlar estos parámetros.

- Estimar la resistencia a compresión simple en concretos con aire incluido mediante el uso de un esclerómetro con su correspondiente curva de calibración subestima aún más la resistencia real del concreto; en este estudio, en las mezclas con aire incluido, el número de rebote no se incrementa significativamente con la edad (1.8%), en comparación con el de las mezclas que no tienen aire incluido (4.4%).
- El porcentaje de aire incluido influye en la determinación de la VPU; en este estudio, las mezclas con aire incluido reportaron valores de VPU menores en comparación con las mezclas que no tienen aire incluido. Porcentajes de aire mayores se traducen en valores de VPU menores y en valores de resistencia a compresión menores. La adición de ceniza volante no modifica significativamente el valor de VPU.
- La adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla reduce la resistencia a compresión simple; sin embargo, no modifica significativamente los valores de módulo de elasticidad, relación de Poisson, deformación unitaria máxima y resistencia a tensión por compresión diametral a las diferentes edades de ensaye.
- La cantidad de carga eléctrica (Coulombs) que atraviesa una muestra de concreto en el ERPC disminuye conforme se añade aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla, por lo que la utilización de estos materiales en cantidades adecuadas es benéfica para reducir la penetración de iones cloruro.
- La adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla aumenta los valores de AAH y VVP con respecto a las mezclas testigo; sin embargo, no tiene una tendencia clara en cuanto a la variación de estos parámetros con la edad, ya que una de las mezclas (M2), cuya clasificación de su calidad, de acuerdo con este criterio, es razonable a 28 días de edad, a 91 días esta calidad aumenta a marginal; además, las mezclas testigo y las mezclas con sustitución parcial de cemento con ceniza volante a 91 días de edad aumentan el valor de ambos parámetros; mientras que las mezclas con aire incluido mantienen en promedio el porcentaje de AAH y el VVP y las mezclas con una combinación de aire y ceniza volante reducen estos porcentajes.
- La adición de aire, ceniza volante y una combinación de ambos a la mezcla no tiene una influencia clara en la obtención de las tasas de absorción inicial y secundaria del ensaye de absorción capilar a diferentes edades de ensaye.
- En cuanto a la contracción por secado última, la adición de aire a la mezcla, la aumenta; la sustitución parcial de cemento con ceniza volante la reduce, y una combinación de ambos la aumenta para una relación a/c de 0.49 y la reduce para una relación a/c de 0.39, con variaciones

poco significativas respecto a las mezclas testigo, por lo que ambos materiales en cantidades adecuadas no perjudican el desempeño del concreto.

- El uso de aditivos inclusores de aire en mezclas de concreto lanzado, además de dar mayor fluidez a la mezcla, reduce el rebote de la misma durante el proceso de lanzado; también disminuye la penetración de cloruros; lo mismo ocurre en cuanto a la utilización de ceniza volante como sustituto parcial de cemento y con una combinación de ambos. Se debe tomar en cuenta en el diseño de mezclas de concreto lanzado que ambos materiales reducen los valores de resistencia a compresión simple; a pesar de ello, se tienen beneficios en cuanto a durabilidad se refiere.
- El ensaye de AAH y VVP no es un parámetro adecuado para estimar la durabilidad del concreto lanzado. Su relación con el ERPC, que es más relevante en términos de transporte de iones cloruro, es pobre; además, no muestra una tendencia clara con la edad del concreto y con la adición de diferentes materiales, tales como aire incluido y ceniza volante.
- Estimar la durabilidad del concreto lanzado permite obtener una estructura de dicho material que soportará las acciones del medio ambiente para las que ha sido diseñada y alcanzar la vida de servicio para la cual ha sido proyectada. Además, permitirá a los propietarios, gerentes y/o administradores de estas estructuras, anticipar las operaciones de mantenimiento de ellas, optimizando así su inversión.
- La estimación de la durabilidad del concreto lanzado a través de los coeficientes de difusión iónica podría ser más precisa. Sin embargo, la determinación de estos coeficientes a edades tempranas del concreto podría ser engañosa, ya que la resistencia a la penetración de cloruros del concreto se desarrolla conforme aumenta su madurez. Esta es quizás, la razón por la que no se puede determinar la vida útil del concreto con la precisión que se desea, aunque se conozcan las condiciones a que estará sometido en obra, ya que estas también son supuestas y pueden cambiar con el tiempo.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Determinar los valores de AAH y VVP en especímenes obtenidos de artesas en las que el concreto se deposita por medio de lanzado.
- Implementación del método de prueba estándar (ASTM C 1556) para la estimación de los coeficientes de difusión iónica en concreto lanzado, haciendo una comparativa entre ellos y el ensaye ERPC.
- Investigación sobre la influencia del uso de adiciones minerales y fibras de acero y sintéticas en la determinación de los coeficientes de difusión iónica en mezclas de concreto lanzado.

REFERENCIAS

ACI 506R-05 (2010). "Guide to shotcrete".

ACI 506.2R (1995). "Specification for shotcrete".

ACI 506.4R (2004). "Guide for the Evaluation of Shotcrete".

ACI CP-60 (2015). "Craftsman Workbook for ACI Certification of Shotcrete Nozzleman".

Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana NMX – C – 000 – ONNCCE – 2016. Industria de la Construcción. Agua para Concreto - Especificaciones.

ASTM C 29 (2010). "Unit Weight and Voids in Aggregate". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 33 (2010). "Standard Specification for Concrete Aggregates". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 39 (2010). "Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". Annual book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 117 (2010). "Materials Finer Than No. 200 Sieve in Mineral Aggregates by Washing". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 125 (2010). "Concrete and Concrete Aggregates". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 127 (2010). "Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 128 (2010). "Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 136 (2010). "Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 138 (2010). "Unit Weight, Yield and Air content (Gravimetric) of Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 143 (2010). "Slump of Portland Cement Concrete". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 157 (2010). "Standard Test Method for Length Change of Hardened Cement Mortar and Concrete". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 192 (2015). "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory".

ASTM C 231 (2010). "Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 260 (2006). "Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete.

ASTM C 469 (2014). "Standard test Methos for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".

ASTM C 470 (2015). "Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders".

ASTM C 490 (2010). "Apparatus for Use in Measurement of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 494 (2010). "Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 496 (2010). "Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens". Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

ASTM C 595 (2010). "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements".

ASTM C 597 (2009). "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete".

ASTM C 617 (2009). "Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens".

ASTM C 618 (2010). "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete".

ASTM C 642 (2013). "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".

ASTM C 805 (2014). "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete".

ASTM C 1140 (2010). "Standard Practice for Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Test Panels".

ASTM C 1141 (2015). "Standard Specification for Admixtures for Shotcrete".

ASTM C 1202 (2012). "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration".

ASTM C 1436 (2013). "Standard Specification for Materials for Shotcrete".

ASTM C 1556 (2011). "Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion".

ASTM C 1604 (2012). "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete".

- Bolduc, L.-S., Jolin, M. y Bissonnette, B. (2010). Evaluating the service life of shotcrete. S. Bernard, Shotcrete : Elements of a System (p. 310). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Bracamontes J., R. A. (2015). Manual para el diseño y aplicación del concreto lanzado. México.
- Bracamontes J., R. A. (2014). Concreto lanzado en la industria minera . Construcción y tecnología en concreto, 16-23.
- David O., J. (2014). Concreto lanzado en tuneles. Construcción y tecnología en concreto, 28-29.
- de Schutter, G., & Audenaert, K. (2004). Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. Materials and Structures.
- Gall, V., Zeidler, K., Munfah, N., & Cerulli, D. (2010). Shotcrete for tunnel final linings – design and construction considerations. In S. Bernard, Shotcrete : Elements of a System (p. 310). London, UK: TAYLOR & FRANCIS GROUP.
- Höfler, J., & Schlumpf, J. (2004). Concreto Proyectado en la Construcción de Túneles. Colombia: Putzmeister.
- Hubáček, A., Brožovský, J., Hela R. (2013). Comparison of Properties of Shotcrete Tested Using Destructive and Non-destructive Methods. Sciencedirect, Procedia Engineering 65, 63-68.
- Jolin, M., & Bolduc, L.-S. (2010). Shotcrete Boiled Water Absorption. Shotcrete.
- Jolin, M., Beaupré, D., Mindess, S. (1999). Tests to Characterise Properties of fresh Dry-mix Shotcrete. Sciencedirect, Cement and Concrete Research 29, 753-760.
- Iwaki, K., Hiram, A., Mitani, K., Kaise, S., Nakagawa, K. (2001). A Quality Control Method for Shotcrete Strength by Pneumatic Pin Penetration Test. Sciencedirect, NDT&E International 34, 395-402.
- Lizarazo-Marriaga, J., & Claisse, P. (2009). Determination of the concrete chloride diffusion coefficient based on an electrochemical test and an optimization model. Materials Chemistry and Physics, 536-543.
- Mangat, P., & Molloy, B. (1994). Predicting of long term chloride concentration in concrete. Materials and Structures, 338-346.
- Morgan, D.R., McAskill, N., Neill, J., & Duke, N.F., (1987). Evaluation of Silica Fume Shotcrete, International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, Montreal, Canada.
- Neville, A. M. (1977). Tecnología del concreto (Tomo I). México, D.F., IMCyC.
- Neville, A. M. (1989). Tecnología del Concreto (Tomo III). México, D.F., Limusa.
- Neville, A. N. (1980). Tecnología del concreto (Tomo II). México, D.F., IMCyC.
- Norma Oficial Mexicana NMX – C – 122 – ONNCCE – 2004. Industria de la Construcción. Agua para Concreto - Especificaciones.
- Ossorio, A., & Lorenzo, R. (2014). Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro. Revista Facultad de Ingeniería Universidad Antioquia.

- Power, P. (2015). Predicting the service life of shotcrete: Investigation on the transport properties of shotcrete mixes. Québec, Canada.
- Propuesta de Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. (2014). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. Capítulo 12.6 Concreto lanzado.
- Ryan, T. F. (1976). Concreto lanzado. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, a.c.
- Samson, E., Marchand, J., & Snyder, K. (2003). Calculation of ionic diffusion coefficients on the basis of migration test results. *Materials and Structures*, 156-165.
- Stanish, K., & Thomas, M. (2003). The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients. *Cement and Concrete Research*, 55-62.
- Torii, K., & Kawamura, M. (1994). Pore structure and Chloride ion permeability of mortars containing silica fume. *Cement & Concrete Composites*, 279-286.
- Vásquez P., E. (2007). Concreto de alto desempeño con elevado consumo de ceniza volante. México D.F., Facultad de Ingeniería, UNAM, México: Tesis de Maestría.
- Yoggy, G. D. (2005). The History of Shotcrete. *Shotcrete Classics*, 26-32.