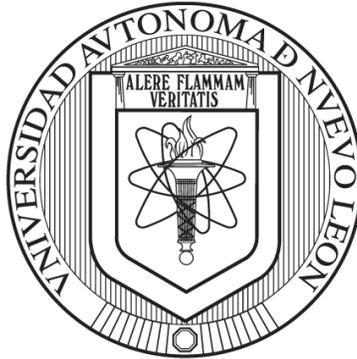


FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**GROUTS BASE CEMENTO PORTLAND MEJORADOS CON
FIBRAS DE BASALTO PARA RELLENO DE DUCTOS DE
CONCRETO POSTENSADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Por:

JOSÉ RAÚL ZAPATA PADILLA

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en
Materiales de Construcción**

Octubre, 2020

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
CAPÍTULO 1	8
1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 Concreto Presforzado	8
1.1.1 Métodos de Presforzado	10
1.1.2 Grouts de Relleno para Postensados	12
1.1.3 Durabilidad del Concreto Presforzado	12
1.1.4 Durabilidad de Postensados	13
1.1.5 Grouts con fibras	14
1.1.6 Fibras de Basalto	15
1.2 Planteamiento del problema	17
1.3 Antecedentes	20
1.3.1 Contracción plástica en cemento Portland	20
1.3.2 Uso de fibras de basalto	21
1.3.3 Uso de fibras en grouts	23
1.3.4 Uso de fibras en resistencia a compresión	24
1.3.5 Uso de fibras en contracción por secado	25
1.3.6 Uso de fibras en permeabilidad iones cloruro	27
1.4 Justificación	29
1.5 Hipótesis	30
1.6 Objetivos	30
1.6.1 Objetivo general	30
1.6.2 Objetivos específicos	30

	3
CAPÍTULO 2	32
2 MARCO TEÓRICO	32
2.1 Historia del concreto presforzado	32
2.2 Terminología de concreto presforzado	33
2.3 Reglamentos para Grouts	37
2.3.1 ACI 351.1R-99, 1999.	37
2.3.2 ACI 222.2R-01, 2001.	38
2.3.3 PTI, Grouts, 2013.	40
2.4 Permeabilidad	41
CAPÍTULO 3	43
3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	43
3.1 Descripción de Materiales	43
3.1.1 Cemento portland	43
3.1.2 Agregado fino	43
3.1.3 Fibras de basalto	44
3.1.4 Aditivos utilizados	44
3.1.5 Grouts en polvo comerciales	46
3.2 Métodos y ensayos	47
3.2.1 Caracterización del Cemento y Grouts Comerciales.	47
3.2.2 Caracterización del Agregado Fino	49
3.2.3 Diseño de mezcla de grout	49
3.2.4 Mezcla de grouts Comerciales	61
3.2.5 Pruebas en estado fresco	62
3.2.6 Pruebas en estado endurecido	64
3.2.7 Pruebas de Permeabilidad	65

	4
CAPÍTULO 4	72
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
4.1 Pruebas en estado fresco.	72
4.1.1 Fluidez	72
4.1.2 Masa unitaria y contenido de aire	72
4.2 Pruebas en estado endurecido	74
4.2.1 Resistencia a compresión	74
4.2.2 Contracción por secado	75
4.3 Pruebas de permeabilidad	78
4.3.1 Permeabilidad al aire	78
4.3.2 Permeabilidad rápida a los iones cloruro (PRCl)	79
4.3.3 Velocidad de pulso ultrasónico	82
4.3.4 Resistividad eléctrica superficial	83
5 CONCLUSIONES	85
6 RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	89

Índice de Figuras

Fig. 1. Curvas contracción por secado de morteros de reparación con fibras de polipropileno y fibras de basalto. Tomada de Jiang et al. 2016.....	27
Fig. 2. Comparación del concreto reforzado y el concreto presforzado.	34
Fig. 3. (a) Concreto pretensado. (b) Concreto postensado.....	36
Fig. 4. (a) Cable no adherido. (b) Cable adherido.	36
Fig. 5. Relación entre %Fluidez, A/C y ASF a 0.44%	51
Fig. 6. Fluidez en morteros con A/C=0.40 y ASF=0.44% y diferentes n.....	53
Fig. 7. Influencia de las fibras de basalto en la fluidez.....	56
Fig. 8. Influencia del ASF en la fluidez.	58
Fig. 9. Materiales para mezclas de grout con fibras	61
Fig. 10. (a) Mesa de fluidez (b) Cono de flujo.....	63
Fig. 11. Recipiente de masa y volumen conocidos.....	63
Fig. 12. Ensayo a compresión de cubos de grout.....	64
Fig. 13. (a) Barras de retracción por secado. (b) Comparador de longitud.....	65
Fig. 14. (a) Cilindros de D=10 cm h=20 cm (b) Cilindros rebanados en porciones de 5 cm de altura	66
Fig. 15. (a) Aparato de permeabilidad al aire conectado a bomba de vacío. (b) válvulas de control. (c) Central de proceso. (d) Cabezal de doble cámara unido a espécimen.	67
Fig. 16. (a) Muestras secas al horno. (b) Muestras en saturación. (c) Muestras con agua en ebullición. (d) Muestras con peso sumergido.	68

Fig. 17. (a) Muestras con pintura epóxica. (b) Muestras colocadas en vacío y saturadas. (c) Preparación de soluciones NaCl y NaOH. (d) Ensayo y monitoreo por 6 h.	69
Fig. 18. (a) Especímenes de grout (b) Aparato de velocidad de pulso ultrasónico.....	70
Fig. 19. (a) Especímenes de grout (b) Medición de resistividad eléctrica superficial	71
Fig. 20. Resistencia a compresión a diferentes edades	75
Fig. 21. Retracción por secado de los grouts con FB y control	78
Fig. 22. Permeabilidad rápida a los iones cloruro en grouts.....	82
Fig. 23. Resultados de pulso ultrasónico a diferentes edades	83
Fig. 24. Resistencia eléctrica Superficial.....	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Contracción de mortero con FB. Adaptada de Jiang et al. 2010.....	26
Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de basalto	44
Tabla 3. Cantidades y proporciones de material para pastas de cemento	50
Tabla 4. Morteros con diferentes relaciones arena-cemento (n).....	52
Tabla 5. Proporciones de materiales para fluidez de 130%	54
Tabla 6. Proporciones de materiales mezclas sin/con ARC.....	54
Tabla 7. Proporciones de materiales con fibra variable	55
Tabla 8. Proporciones de materiales con aditivo variable.....	57
Tabla 9. Proporciones de mezclas de grouts comerciales (GC).....	62
Tabla 10. Densidad sin aire de los grouts comerciales (GC).	73
Tabla 11. Densidad de mezcla con aire atrapado.	73
Tabla 12. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión	75
Tabla 13. Mediciones de retracción por secado de grout con FB	77
Tabla 14. Resultados de permeabilidad al aire.....	79
Tabla 15. Penetrabilidad el ion cloruro basada en la carga pasada (AASHTO T 277-86, 1990; ASTM C1202 – 10, 2010)	79
Tabla 16. Permeabilidad rápida a iones cloruro en grouts	81

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 Concreto Presforzado

La ingeniería estructural tiende a progresar hacia estructuras más económicas a través de métodos de diseño gradualmente mejorados y el uso de materiales de mayor resistencia. Esto da como resultado una reducción de las dimensiones de la sección transversal y el consiguiente ahorro de peso. Tales desarrollos son particularmente importantes en el campo del concreto reforzado, donde la carga muerta representa una parte sustancial de la carga total. Se pueden lograr ahorros significativos mediante el uso de concreto y acero de alta resistencia junto con los métodos de diseño actuales, que permiten una evaluación precisa de la resistencia de los miembros. Sin embargo, existen limitaciones para este desarrollo, debido principalmente a los problemas interrelacionados de agrietamiento y deflexiones en las cargas de servicio. El agrietamiento excesivo no es deseable ya que expone el refuerzo a la corrosión, puede ser antiestético y puede provocar una falla prematura por tensión diagonal. El uso de materiales de alta resistencia está aún más limitado por consideraciones de deflexión, los miembros delgados que resultan pueden permitir deflexiones que son funcional o visualmente inaceptables. Esto se agrava aún más por el agrietamiento, lo que reduce la rigidez a la flexión de los miembros (Darwin et al., 2016).

Estas características limitantes del concreto reforzado ordinario han sido superadas en gran medida por el desarrollo de *concreto presforzado*. Un miembro de concreto presforzado puede definirse como un concreto estructural al que se le inducen permanentemente esfuerzos de compresión internos mediante elementos de aceros, con el objeto de contrarrestar, hasta cierto punto, los esfuerzos de tensión causados por las cargas aplicadas (Darwin et al., 2016; Khachaturian & Gurfinkel, 1969; McCormac & Brown, 2018; PTI Committee PTT, 2013). El concreto es básicamente un material de compresión, con una resistencia a la tensión relativamente baja. El presforzado aplica una precompresión al miembro que reduce o elimina los esfuerzos de tensión indeseables que de otro modo estarían presentes. Las grietas bajo cargas de servicio se pueden minimizar o incluso evitar por completo. Las deflexiones pueden limitarse a un valor aceptable y, en algunos casos, los miembros pueden diseñarse para tener una deflexión de cero bajo los efectos combinados de la carga de servicio y la fuerza de presfuerzo. La deflexión y el control de grietas, logrados mediante presfuerzo, permiten al ingeniero utilizar aceros de alta resistencia económicos y eficientes en forma de hebras, alambres o barras, junto con concretos de alta resistencia (Darwin et al., 2016).

La teoría del presfuerzo es bastante simple y se ha usado durante muchos años en varios tipos de estructuras. Por ejemplo, los barriles de madera se construyen con cinchos metálicos, que comprimen las duelas entre sí formando un recipiente hermético con resistencia a las presiones de los líquidos contenidos (Lin, 1963; McCormac & Brown, 2018). El presfuerzo se usa principalmente en vigas de concreto para contrarrestar los esfuerzos de tensión causados por el peso propio del miembro y las cargas sobrepuestas (McCormac & Brown, 2018). El concreto presforzado probablemente es la innovación de mayor importancia en el concreto estructural y en la industria de la construcción de los años

recientes. El presforzado del concreto por medio del acero de alta resistencia permite el uso del acero y del concreto con un grado de eficiencia sumamente alto. El concreto reforzado en forma convencional se vuelve masivo e impráctico para los vanos simples mayores a 12 m. No existen limitaciones de este tipo en el concreto presforzado, y este puede aplicarse en vanos mayores a 30 m. El concreto presforzado proporciona muchas posibilidades para la construcción y puede emplearse en una gran diversidad de situaciones con ventaja, por ejemplo: tanques de almacenamiento de agua, estadios y graderías, puentes prefabricados de grandes claros, túneles de autopistas etc. (Khachaturian & Gurfinkel, 1969).

1.1.1 Métodos de Presforzado

En términos generales, existen dos formas en que puede lograrse el presforzado del concreto, estos son, el *pretensado* y el *postensado*. La principal diferencia entre los dos métodos se refiere a la condición durante el momento en que los elementos de acero se tensan. En el método de pretensado, el acero se tensa antes de colar el concreto, mientras que en el postensado los cables de acero se tensan después que el concreto ha sido vaciado y solamente cuando tiene la suficiente resistencia para soportar el esfuerzo (Khachaturian & Gurfinkel, 1969).

1.1.1.1 Sistema de Pretensado

El sistema de pretensado toma su nombre del hecho que el acero de presfuerzo se tensa *antes* que el concreto se haya vaciado (Khachaturian & Gurfinkel, 1969; PTI Committee PTT, 2013). El acero se *ancla* inicialmente en los muertos de anclaje, por lo general en patios de prefabricados. Aunque en algunos casos en mesas de colado localizas en la

obra (Branson, 1976). Después que el concreto endurece y ha alcanzado cierta resistencia, se cortan los tendones de acero de sus anclajes y el concreto recibe una compactación previa, por medio de la transferencia de esfuerzos y a través de la adherencia entre el acero y el concreto (Branson, 1976; Khachaturian & Gurfinkel, 1969; McCormac & Brown, 2018). Por consiguiente, los cables quedan necesariamente adheridos (Branson, 1976).

1.1.1.2 Sistema de Postensado

En el *concreto postensado* (CPT) el acero de presfuerzo se coloca en ductos y se tensa una vez que el concreto ha fraguado y alcanzado cierta resistencia (Branson, 1976; McCormac & Brown, 2018; Randell et al., 2015). Los elementos se pueden construir como unidades prefabricados o bien, pueden ser colados en la obra. El acero se ancla en un extremo y se tensa por medio de un gato hidráulico en el otro extremo. Al concreto se le aplica previamente una fuerza de compresión por medio de los anclajes en los extremos de las vigas (Branson, 1976). Inicialmente el acero no está adherido, pero se puede inyectar a presión un *grout* de cemento para rellenar el espacio entre el cable y el ducto. La incorporación de este grout proporciona adherencia entre los cables y el concreto, por lo cual se incrementa considerablemente la resistencia a la flexión, la ductilidad del miembro y la resistencia última (mediante una mejor distribución de grietas) (ACI 222.2R-01, 2001; Branson, 1976; Khachaturian & Gurfinkel, 1969; McCormac & Brown, 2018). Esta adherencia tiene poco efecto en el comportamiento del miembro en condiciones normales de carga; pero en caso de una sobrecarga llegaría a afectar tanto la naturaleza del agrietamiento como en el factor de seguridad contra la falla de la sección (Allen, 1978). La inyección de grout también protege al cable contra la corrosión (ACI 222.2R-01, 2001; Allen, 1978; Khachaturian & Gurfinkel, 1969; McCormac & Brown, 2018; Nawy, 2010;

Randell et al., 2015). Puede hacerse uso de cables de acero galvanizado para eliminar totalmente la inyección del grout de consolidación, dejando los cables sin unirse al concreto. Sin embargo, esta práctica no es conveniente debido a que resulta en vigas de baja resistencia al flexión y ductilidad (Khachaturian & Gurfinkel, 1969). Otra práctica común para tendones no adheridos es que se protegen por un conducto de plástico y grasa anticorrosiva colocada en el espacio anular alrededor del tendón, esto para facilitar su tensado y protegerlos contra la corrosión (McCormac & Brown, 2018; Nawy, 2010).

1.1.2 Grouts de Relleno para Postensados

Los *grouts* para postensados se definen como una mezcla de materiales cementantes y agua, con o sin adiciones minerales, aditivos químicos o agregado fino, proporcionados para producir una consistencia bombeable sin segregación de los componentes inyectados en el conducto para llenar el espacio alrededor del acero de pretensado (PTI Committee PTT, 2013). La inyección de este grout brinda dos beneficios principales: protección contra la corrosión del tendón con el ambiente altamente alcalino proporcionado por el grout, y unión entre el concreto y el tendón (ACI 222.2R-01, 2001; Randell et al., 2015). Esto sólo puede ser cierto cuando el conducto se llena de manera adecuada y sólida con grout. Se han atribuido varios problemas a la falta o la inyección inadecuada del grout (ACI 222.2R-01, 2001).

1.1.3 Durabilidad del Concreto Presforzado

En este tipo de estructuras, al presforzar el acero, el concreto se coloca bajo compresión a cargas de trabajo normales, evitando así grietas por tensión en el concreto. En condiciones normales, la experiencia ha demostrado que la durabilidad del refuerzo en

concreto pretensado es excelente, pero la aplicación de un alto nivel de esfuerzo de aproximadamente el 70% de resistencia a la tensión máxima, aumenta los efectos de la corrosión del acero (Treadaway, 1971). La protección contra la corrosión del acero de presfuerzo es más crítica que en el caso del acero no presforzado. La reducción del área del acero de presfuerzo debido a la corrosión puede reducir drásticamente la resistencia a momento nominal de la sección presforzada, lo que puede provocar una falla prematura del sistema estructural (Nawy, 2010).

Otra forma de deterioro de los tendones es la corrosión por tensión, que se caracteriza por la formación de grietas microscópicas en el acero que provocan fragilidad y rotura (Nawy, 2010). La corrosión por tensión es una de las principales causas de falla en estructuras de concreto presforzado y es más crítica que la corrosión tradicional porque conduce a fallas abruptas y frágiles de los tendones sin ninguna restricción o señal de advertencia clara y sin un alargamiento final suficiente (Vu et al., 2009). En elementos pretensados, el concreto que rodea el tendón proporciona protección contra la corrosión, siempre que se disponga de una cubierta de concreto adecuada. En los miembros postensados, la protección se puede obtener mediante el grouteado total de los conductos después de que se haya completado el pretensado o mediante un engrase (Nawy, 2010). Los factores más importantes en la protección de este tipo de refuerzo son la calidad del concreto, del grout, y su proceso de grouteado. El concreto debe ser denso, impermeable, duradero y uniforme, y el grout en los postensados debe ser de calidad similar (Szilard, 1969; Treadaway, 1971).

1.1.4 Durabilidad de Postensados

El acero de presfuerzo, como el acero de refuerzo tradicional, es pasivo en contacto con materiales de cemento alcalino (Bertolini et al., 2013; Carsana & Bertolini, 2016). Por

esta razón, la protección de los filamentos en estructuras postensadas se puede garantizar mediante la inyección en el conducto de un grout de cemento, con aditivos apropiados para aumentar su estabilidad (Carsana & Bertolini, 2016). El control de calidad del grout es un problema crítico, ya que el grout actúa como una última línea de defensa para evitar la entrada de varios iones y compuestos perjudiciales como cloruros, humedad y otras sustancias, que inician la corrosión al llegar a los filamentos (Garg & Misra, 2020). La corrosión no solo debilita el área de la sección transversal del filamento y degrada la ductilidad y la resistencia máxima, sino que también induce grietas en el concreto y conduce a la pérdida del presfuerzo (Wang et al., 2020).

1.1.5 Grouts con fibras

Es de destacar que los materiales a base de cemento son más frágiles que otros materiales y tienen desventajas inherentes que incluyen baja resistencia a la tensión y debilidad en la resistencia al impacto (Jiang et al., 2010, 2014, 2016). Para mejorar la resistencia a la tensión del concreto, es necesario disminuir la cantidad de microgrietas y controlar su crecimiento de manera efectiva (Jiang et al., 2010). También se ha reportado de manera específica que los grouts de cemento portland son susceptibles a agrietamientos (Huang, 2001). Para mitigar este problema de agrietamiento y deterioro, la incorporación de fibras en los grout de cemento se considera una posible solución (Huang, 2001), ya que puede proporcionar control de la fisuración y aumentar la tenacidad a la fractura de la matriz quebradiza a través de la acción de puente durante la micro y macro-fisuración de la matriz (Jiang et al., 2010, 2014, 2016).

La adición de fibra a la pasta de cemento mejora las resistencias a la flexión y a la tensión del mortero y concreto (Jiang et al., 2010, 2014, 2016; Ralegaonkar et al., 2018;

Sun et al., 2019) y puede disminuir significativamente los agrietamientos debido a la contracción por secado, aumentar la resistencia a la abrasión, impermeabilidad y resistencia al hielo y deshielo (Jiang et al., 2016), pero hay información limitada disponible sobre los grouts de cemento (Huang, 2001). Para reforzar la matriz cementante se pueden usar diferentes tipos de fibras, como acero o materiales orgánicos (Jiang et al., 2010, 2014).

1.1.6 Fibras de Basalto

Debido a su excelente rendimiento, la fibra de basalto ha atraído gran atención en múltiples industrias (Jiang et al., 2010; Sun et al., 2019). En comparación con el concreto con fibra de polietileno, el concreto con fibra de basalto no solo es propicio para el ahorro de costos (Sun et al., 2019), sino que también tiene un mejor rendimiento en la resistencia de la unión con cemento debido a que su propiedad química es más similar al cemento (Rybin et al., 2013; Sun et al., 2019; Wei et al., 2010).

Algunos estudios han indicado que las fibras de basalto sin ningún recubrimiento protector carecen de durabilidad a largo plazo en el ambiente alcalino del concreto (Lee et al., 2014; Rabinovich et al., 2001). Hasta que se resuelva este problema, una aplicación útil de la fibra en su estado actual de desarrollo podría ser mejorar la durabilidad del concreto al evitar el agrietamiento temprano debido a la contracción plástica (Branston et al., 2016). También se ha informado que la fibra de basalto disminuye la fluidez de los morteros de cemento (Choi, Yun-Wang et al., 2014; Jiang et al., 2010), y se espera que tenga este mismo efecto en los grouts, por lo que debe adicionarse una cantidad de fibra que cumpla con la fluidez mínima necesaria para asegurar un completo llenado de los ductos y evitar la formación huecos o vacíos que es uno de los problemas más preocupantes ya que

permiten el ingreso de humedad o agentes de deterioro al acero de presfuerzo (Garg & Misra, 2020).

En este estudio se investigaron los efectos de la fibra de basalto para disminuir los cambios volumétricos o contracciones de los grouts, utilizando cantidades de fibras que no desmeriten la fluidez del grout. También se adicionó un aditivo superfluidificante (ASF) y un aditivo reductor de la contracción (ARC). De igual manera se analizó la influencia de las fibras de basalto en la porosidad y permeabilidad del grout como un indicador de protección física de los tendones de presfuerzo.

1.2 Planteamiento del problema

En la construcción postensada y adherida, el tendón generalmente está en contacto con un grout de cemento Portland. Este grout se inyecta en un conducto de polietileno o acero galvanizado incrustado en el concreto (ACI 222.2R-01, 2001). Este sistema debería brindar una protección superior contra la corrosión sobre la construcción postensada debido a las barreras adicionales (Garg & Misra, 2020; Wang et al., 2020). Esto puede ser cierto cuando el conducto se llena de manera adecuada y sólida con grout. Se han atribuido varios problemas a la falta o la inyección inadecuada de grout (Choi, Yun-Wang et al., 2014; Minh et al., 2008; Yoo et al., 2015). Además, el rendimiento del acero de presfuerzo embebido en concreto puede no ser necesariamente indicativo del comportamiento de los sistemas postensados adheridos con un grout. La mayoría de los problemas asociados con la construcción postensada adherida ocurren como resultado de una inyección inadecuada del grout (ACI 222.2R-01, 2001; Minh et al., 2008; Wang et al., 2014; Yoo et al., 2015).

El grout de cemento une al acero de presfuerzo al concreto circundante y proporciona protección contra la corrosión para el acero. El grout de cemento es una barrera para la penetración de humedad y cloruros y produce un ambiente alcalino para el tendón. Un grout óptimo para el postensado combina propiedades adecuadas en estado fresco y protección contra la corrosión. Las propiedades en estado fresco del grout influyen en qué tan bien el grout llena los espacios vacíos entre el conducto y el torón. La protección contra la corrosión provista por el grout se vuelve ineficaz si el conducto se llena solo parcialmente o con discontinuidades, ya que se genera una red de vacíos. Estas situaciones pueden provocar corrosión severa. La presencia de huecos o discontinuidades también puede

permitir el movimiento de humedad y cloruros a lo largo del tendón (ACI 222.2R-01, 2001).

La estructura de poros afecta el comportamiento del material a base de cemento quizás más que cualquier otra característica del material (Kondraivendhan & Bhattacharjee, 2010). Los poros dentro del compuesto se clasifican en poros conectados y poros cerrados (Zhao et al., 2019). La permeabilidad se ve afectada por los poros interconectados, mientras que la resistencia a la compresión se ve afectada por todos los tipos de poros (Kondraivendhan & Bhattacharjee, 2010). Los factores clave que influyen en la porosidad de los materiales a base de cemento portland son principalmente la relación agua-cemento (a/c) y el aire incluido (Zhao et al., 2019). El agrietamiento temprano debido a la contracción plástica a menudo se atribuye a la reducción de la durabilidad de las estructuras de concreto (Branston et al., 2016). Se ha encontrado que las fibras de basalto son efectivas para prevenir las grietas al reducir la magnitud de la contracción libre y a restringir el crecimiento de las grietas si ocurren. El último mecanismo es más prominente cuando disminuye la relación a/c (Branston et al., 2016). Estos agrietamientos permiten la penetración de agua y cloruros permitiendo así la corrosión del acero de presfuerzo (Branston et al., 2016).

Los argumentos anteriores sugieren diseñar un grout con una baja permeabilidad como barrera física para evitar la penetración de humedad y de agentes agresivos que propicien corrosión en los filamentos del acero. Es sabido que las relaciones bajas de a/c provocan una densificación de la matriz cementante, reduciendo así su porosidad. Pero en contraparte las relaciones bajas a/c disminuyen la fluidez, por lo que es necesario incorporar un ASF para obtener una fluidez adecuada. Para prevenir los agrietamientos en la etapa plástica del grout, se incorporará fibras de basalto, las cuales junto con un aditivo

reductor de la contracción (ARC) reducirán los cambios volumétricos y restringirá el crecimiento de grietas en las edades tempranas del grout, lo que resultará en un grout de baja permeabilidad.

1.3 Antecedentes

1.3.1 Contracción plástica en cemento Portland

1.3.1.1 Newlands et al., 2008

Un método de prueba lineal para determinar la contracción del concreto a una edad temprana (Newlands et al., 2008). Encontraron que, para ciertas aplicaciones, la estabilidad dimensional del concreto a una edad temprana puede afectar significativamente la estética y el desempeño de durabilidad a largo plazo. Los efectos combinados del asentamiento plástico, la contracción plástica y la contracción autógena en el concreto en estado fresco y endurecido dependerán de las proporciones de la mezcla, los materiales constituyentes y las condiciones ambientales, así como los niveles de restricción que inducen grietas. También desarrollaron un nuevo método de prueba lineal para medir la contracción a temprana edad en el concreto para permitir la investigación de los efectos de nuevos componentes en la estabilidad inicial del volumen. Investigaron la repetibilidad de un solo operador en condiciones de laboratorio y la sensibilidad de la prueba a temperatura variable ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), humedad relativa ($10\% \pm 2\%$, $50\% \pm 5\%$, $95\% \pm 5\%$) y la velocidad del viento (7.5 km/h) también se determinó. El método de prueba se consideró adecuado para su uso como herramienta para medir la influencia de nuevos tipos de cementos y agregados en la estabilidad volumétrica del concreto en edades tempranas.

1.3.2 Uso de fibras de basalto

1.3.2.1 Jiang et al., 2010

Influencia de la fibra de basalto en el rendimiento del mortero de cemento (Jiang et al., 2010). El objetivo principal de este estudio fue evaluar el rendimiento del mortero con fibras de basalto (BF) con diferentes niveles de contenido. Los resultados del estudio indican lo siguiente: es posible utilizar BF en el campo de cemento reforzado con fibras. La adición de BF redujo la contracción marcadamente seca del mortero, especialmente a edades tempranas. La adición de BF tenía una mayor resistencia a la compresión y a la flexión al comienzo del período de hidratación, pero tenía un poco menos de resistencia a la edad de 28 días que el mortero sin fibra. En comparación con el mortero sin fibra, la carga de fractura del mortero BF con contenido diferente aumentó, pero no fue muy notable. La adición de BF aumenta la deflexión del mortero a la misma carga en comparación con el mortero sin fibra. Con el aumento del contenido de fibra, la deflexión aumenta a la misma carga, lo que demuestra que la adición de BF puede aumentar la tenacidad, mejorando la propiedad de resistir la deformación y el agrietamiento del mortero. Las imágenes SEM de microestructura mostraron que hay una buena unión entre la superficie BF y la matriz de cemento hidratado en edades tempranas. Un significado importante de estos hallazgos es que el nuevo BF puede usarse como un producto sustituto competitivo de otras fibras como la fibra de polipropileno (PP) en el campo de los compuestos de cemento reforzado.

1.3.2.2 Branston et al., 2016

Influencia de las fibras de basalto en la contracción plástica libre y restringida (Branston et al., 2016). Mencionaron que el agrietamiento a edades tempranas debido a la contracción plástica a menudo causa la reducción de la durabilidad de las estructuras de concreto. El objetivo del trabajo fue evaluar el uso potencial de fibras de basalto picadas para prevenir dichos agrietamientos. Se realizaron pruebas para medir la magnitud de la deformación por contracción que se desarrolla en muestras no restringidas, y la gravedad de la fisuración que se produce cuando se restringe la contracción. Los resultados indicaron que las fibras de basalto son efectivas para prevenir las grietas al reducir la magnitud de la contracción libre y al restringir el crecimiento de las grietas si ocurren. El último mecanismo es más prominente cuando disminuye la relación agua-cemento.

1.3.2.3 Bertelsen et al. 2020

Influencia de las características de la fibra en el agrietamiento por contracción plástica en materiales a base de cemento: una revisión (Bertelsen et al., 2020). Presentaron una revisión detallada de la investigación existente relacionada con el agrietamiento por contracción plástica que incluye comparaciones de métodos de evaluación a escala de laboratorio, técnicas de medición de grietas y la influencia de varios tipos de fibras. Mencionaron que de fibras distribuidas aleatoriamente para controlar el agrietamiento por contracción plástica ha mostrado buenos resultados y se han presentado en la literatura varias fibras de diferentes materiales, propiedades mecánicas, geometrías, formas y fracciones de volumen. Las características de la fibra se analizaron con datos de estudios anteriores mediante estadística descriptiva. A partir de este análisis, se descubrieron que muchas características relevantes de la fibra tienen una influencia positiva en el control de la

formación de grietas. Estos efectos positivos se encontraron para fibras con un diámetro de fibra más fino, una relación de aspecto más alta, un aumento en el número de fibras por unidad de volumen y superficie específica de la fibra, así como la influencia de los enlaces de fibra a matriz interfaciales químicas y mecánicas. También encontraron que el aumento en la fracción de volumen de fibra tiene un efecto positivo cuando se agrega a la mezcla en un límite superior. Observaron que no hay una correlación clara entre la influencia de la fibra sobre el grado de agrietamiento de la superficie y la longitud de la fibra o el módulo de la fibra.

1.3.3 Uso de fibras en grouts

1.3.3.1 Huang, 2001

Mejora de las propiedades de grout de cemento y cenizas volantes con fibra y superplastificante (Huang, 2001). En esta investigación se estudiaron las propiedades físicas de los grouts para el aislamiento de desechos radiactivos de bajo nivel. Para producir un grout viable, resistente a los agrietamientos, impermeable y duradero, las mezclas de grout estudiadas contenían cemento, cenizas volantes, agua, fibra de polipropileno (PP) y aditivo superplastificante (SP). Los estudios de laboratorio incluyeron viscosidad, sangrado, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y a la flexión, estructura de poros, permeabilidad al agua y durabilidad de las mezclas de grout. Los resultados indicaron que los grouts que contenían fibra orgánica eran más resistentes a las grietas y menos vulnerables a los cambios ambientales, pero mostraron una mayor viscosidad y permeabilidad. Con la incorporación de SP en las mezclas de grout, los efectos adversos introducidos por la fibra orgánica se corrigieron con mejoras adicionales en la viscosidad, la resistencia a la flexión,

la permeabilidad al agua y la durabilidad contra el ciclo húmedo-seco y el ataque de sulfato.

Encontraron que los grouts estudiados tienen aplicaciones en situaciones subterráneas, tales como inyección a huecos subterráneos y zonas de fractura, interfaces suelo/roca-concreto, sellado de contenedores y espacios entre contenedores de desechos radiactivos de bajo nivel. La sustitución del 30% de cemento por cenizas volantes Clase F produce grouts económicos con propiedades físicas razonables. La adición de fibra del PP por sí sola puede tener efectos adversos sobre las propiedades estado fresco del grout fresca y endurecido, pero mejora significativamente la resistencia del grout al agrietamiento y los cambios en el volumen como resultado de los ciclos húmedo-seco y el ataque de sulfato. Los grouts que contienen la cantidad apropiada de SP muestran fluidez y viscosidad mejoradas, mayores resistencias y permeabilidad reducida. Además, los efectos adversos introducidos por la adición de fibra generalmente se eliminan mediante el uso de SP. Para asegurar mejores propiedades físicas y durabilidad del grout de cemento y cenizas volantes, recomiendan que el uso de fibra PP siempre vaya acompañado de la incorporación de SP.

1.3.4 Uso de fibras en resistencia a compresión

1.3.4.1 Dias y Thaumaturgo, 2005

(Dias & Thaumaturgo, 2005) informaron que para el concreto de cemento Portland, la adición de fibra de basalto en una fracción de volumen del 1.0% y 0.5% provocaron una reducción del 26.4% y 3.9%, respectivamente, en la resistencia a la compresión a los 28 días. Esto debido a que a medida se aumenta el porcentaje de fibra, mayor es la

probabilidad de dejar huecos en la matriz o que las fibras absorban demasiada agua, dejando al cemento a su alrededor sin la suficiente agua para hidratarse.

1.3.4.2 Jiang et al., 2014

(Jiang et al., 2014) reportaron que la adición de fibra de basalto en fracción de volumen de 0.05%, 0.1%, 3% y 0.5%, puede mejorar la resistencia a la compresión del concreto entre 3.74% a 6.49% a edades de 7 días, respecto a la mezcla de control sin fibra. Sin embargo, el aumento de la resistencia a la compresión a una edad avanzada es menor que a una edad temprana. A los 28 días el cambio en la resistencia a la compresión varió entre -0.18% a 4.68%, incluso la reducción de la resistencia a la compresión fue más evidente a los 90 días.

1.3.5 Uso de fibras en contracción por secado

1.3.5.1 Jiang et al. 2010

(Jiang et al., 2010), demostraron que se puede reducir la contracción por secado del mortero de cemento reforzándolo con fibras de basalto. El refuerzo de fibra no solo aumenta la tenacidad del mortero, sino que también aumenta la resistencia a los golpes y al agrietamiento por contracción plástica. En la **Tabla 1** se muestran las mezclas que realizaron. La adición de fibras se hizo en fracciones de 0.9, 1.2 y 1.5 kg/m³. Los resultados demostraron que las muestras con FB exhibieron una contracción menor en comparación de la mezcla de referencia en diferentes edades, especialmente a edades tempranas. La contracción por secado de la mezcla de mortero con 0.9 kg/m³ de fibra curada durante 1 día y 3 días fue menor que la del mortero de mezcla de referencia en un 60% y 30.6% respectivamente. También mencionaron que entre mayor es el contenido de fibra en la

mezcla, menor es la contracción por secado exhibida por la mezcla. Con el aumento de las edades de curado, disminuyó el efecto de BF sobre los comportamientos de contracción de la mezcla. A los 28 días, la influencia de BF en la contracción del mortero no fue muy efectiva.

1.3.5.2 Jiang et al., 2016

(Jiang et al., 2016), en este otro artículo estudiaron el comportamiento del mortero con respecto a la adición de fibras de polipropileno (PP) y fibras basalto (BF) para aplicaciones de reparación. Se utilizaron un total de siete mezclas de mortero, incluyendo una mezcla de mortero control y seis mezclas de mortero con fibra de PP y BF de 0.6, 1.6 y 2,6 kg/m³. Los valores de contracción por secado de las muestras de mortero fueron medidos en los períodos de curado de 1, 3, 7, 14, 21, 28 y 56 días, que se muestran en la **Fig. 1**. Observaron que la contracción por secado aumenta con el tiempo de curado para todas las muestras, aumentando más rápidamente en las primeras etapas y disminuyendo en etapas posteriores. Por otro lado, tanto la fibra de PP como la BF reducen la contracción por secado del mortero de manera efectiva, en comparación con el mortero de control. La disminución del valor de contracción por secado del mortero es más evidente con el aumento del contenido de fibra. También comentaron que, a un determinado contenido de fibra, la utilización de fibra de PP en el mortero puede mitigar más eficazmente la contracción por secado que la incorporación de BF al mortero.

Tabla 1. Contracción de mortero con FB. Adaptada de Jiang et al. 2010

No.	Cont. de fibra Kg/m ³	Contracción por secado (%)									
		1 d		3 d		7 d		14 d		28 d	
		Med (%)	SE (%)	Med (%)	SE (%)	Med (%)	SE (%)	Med (%)	SE (%)	Med (%)	SE (%)
1	0	0.025	--	0.049	--	0.069	--	0.078	--	0.088	--

2	0.9	0.010	-60.00	0.034	-30.61	0.051	-26.09	0.063	-19.23	0.078	-11.36
3	1.2	0.009	-64.00	0.031	-36.73	0.048	-30.43	0.06	-23.08	0.07	-20.45
4	1.5	0.009	-64.00	0.032	-34.69	0.05	-27.54	0.061	-21.79	0.065	-26.14

Notas: SE (%) = [(resistencia del mortero - resistencia mortero de control) / resistencia mortero de control]

100%.

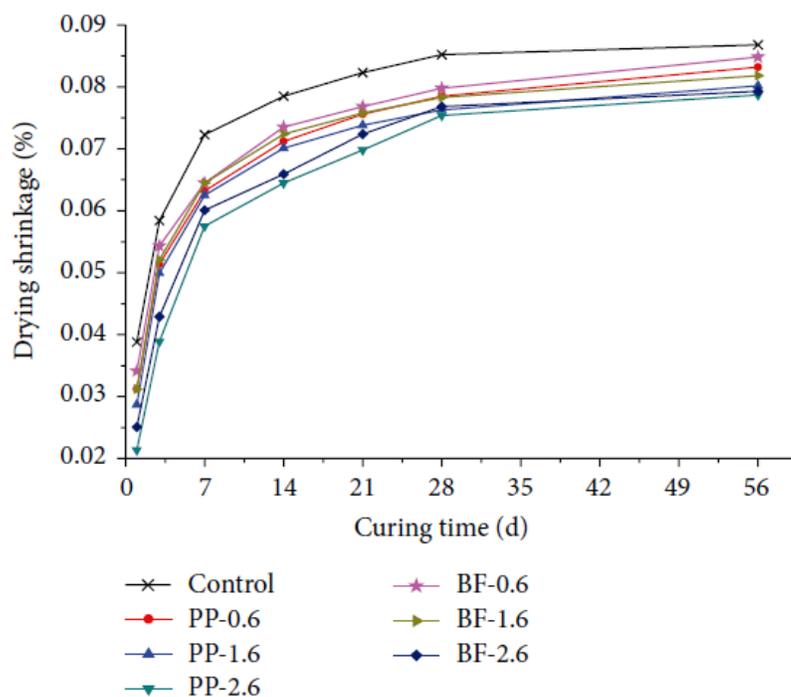


Fig. 1. Curvas contracción por secado de morteros de reparación con fibras de polipropileno y fibras de basalto. Tomada de Jiang et al. 2016.

1.3.6 Uso de fibras en permeabilidad iones cloruro

1.3.6.1 Algin y Ozen, 2018

(Algin & Ozen, 2018) informaron el efecto de las fibras de basalto en la PRCl en el concreto autocompactable (CAC). Analizaron tanto el efecto de la longitud de la fibra como la cantidad. Las longitudes de las fibras fueron de 3, 6, 12 y 24 mm de longitud y se incorporan a las mezclas de CAC como 0%, 0.1%, 0.3% y 0.5% del volumen de concreto.

La mezcla de control del CAC sin fibra obtuvo una permeabilidad al cloruro de 2,500 Coulombs, y la incorporación de la fibra en 0.10% del volumen de concreto, de basalto redujo la permeabilidad al cloruro en un rango de 1850-2500 Coulombs, es decir 2,175 Coulombs en promedio, que corresponde a una efectividad respecto a la mezcla de control de 13.0% en reducción de permeabilidad al cloruro por incorporación de fibra.

1.3.6.2 Niu et al., 2019

(Niu et al., 2019) reportaron el efecto de la incorporación híbrida de fibra basalto (FB) y fibra polipropileno (FP) en concreto de los grados de resistencia C30, C40 y C50. Los materiales cementantes utilizados en este estudio incluyeron cemento Portland (OPC) P.O 42.5R, escoria de alto horno granulada (GFS), humo de sílice (SF) y cenizas volantes (FA). Los resultados de PRCl indican que la indican que cuando la fracción volumétrica de la fibra es baja, la permeabilidad al cloruro es menor que el del concreto de referencia, debido a que las fibras se distribuyen en la matriz del concreto para formar un sistema de soporte tridimensional que restringe la producción y desarrollo de microgrietas, y las fibras aprietan los poros capilares del mortero. La reducción máxima de la permeabilidad al cloruro fue por la mezcla con FB=5% y FP=10% (FB5FP10) para el concreto grado C50. La mezcla de control sin fibras (FB0FP0) obtuvo una permeabilidad de 450 Coulombs y mezcla de FB5FP10 obtuvo una permeabilidad de 300 Coulombs, esto corresponde a una efectividad de 33.33% en reducción de permeabilidad al cloruro por uso de fibras híbridas de basalto-polipropileno.

1.4 Justificación

La mezcla de relleno propuesta para la solución de los problemas en el concreto postensado es un grout mejorado. Una mezcla de grout puede o no llevar adicionados agregados finos, pero como es conocido la pasta de cemento pura es inestable volumétrica y por lo tanto es de esperarse que presente agrietamientos. Disminuir el contenido de cemento a la mezcla con la adición de agregado fino contribuye tanto en desempeño y economía. Estos problemas de contracciones volumétricas también podrían ser disminuidos a su vez con la adición de un aditivo reductor de la contracción (ARC). Para que el grout tenga un buen desempeño mecánico y de durabilidad debe ser una mezcla con bajas relaciones de agua-cemento, y a través de un aditivo superfluidificante (ASF) alcanzar la fluidez requerida para un grout fluido.

Como se mencionó anteriormente, uno de los principales retos para un grout de relleno de conductos de concreto postensado es evitar los agrietamientos que se dan en el proceso de fraguado. Estos agrietamientos se dan por las tensiones internas por las contracciones durante el fraguado. La tecnología propuesta que resuelva estos problemas es la adición de fibras de basalto a la mezcla. Estas fibras se han usado hace mucho tiempo en el concreto para disminuir sus contracciones, y se busca que los beneficios que en este ha causado sean reproducibles en un grout. Un concreto reforzado con fibras tiene una matriz compuesta por la pasta de cemento y la fibra de refuerzo, esta expande el esfuerzo a través de las grietas creadas en la matriz. Ante la grieta, una característica mecánica de la fibra es primordial: El módulo de Young, que define la rigidez de la fibra. Mientras más alto es este Módulo, mejor será el control de las grietas creadas en términos de longitud y abertura.

1.5 Hipótesis

Los grouts base cemento portland mejorados con microfibras de basalto en cantidades de 0.03% a 0.10% en volumen, con la adición de un aditivo superfluidificante y uno reductor de la contracción, tendrán una reducción de las retracciones y la permeabilidad, sin demeritar sus propiedades en estado fresco, y el desempeño mecánico.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Desarrollar grouts base cemento portland mejorados con microfibras de basalto en proporciones de 0.03% a 0.10% del volumen, con un aditivo superfluidificante y uno reductor de la contracción, valorando su fluidez, densificación y reducción de la contracción como indicadores para ser usado en el relleno de conductos de postensados.

1.6.2 Objetivos específicos

- Analizar los parámetros de diseño dictados por las normas y reglamentos de grouts para su óptimo uso como material de relleno de ductos de postensados.
- Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de dos grouts comerciales para establecer los resultados como referencia para compararlos con los grouts de laboratorio.
- Analizar el efecto de la relación agua-cemento en la fluidez de la pasta y cómo influyen el aditivo superfluidificante y el reductor de la contracción en la misma.

- Establecer la influencia del agregado fino y de las fibras de basalto en la disminución de la fluidez, para así adicionar cantidades adecuadas.
- Establecer la dosificación óptima de aditivo superfluidificante cuando se utiliza junto con el aditivo reductor de la contracción para así prevenir segregación.
- Evaluar los porcentajes de fibra de 0.03 a 0.10% en volumen, en el desempeño mecánico de compresión y flexión.
- Definir el efecto de las fibras de basalto y aditivos en los niveles de densificación y permeabilidad.
- Analizar el aporte de las fibras de basalto en la disminución de las contracciones.
- Establecer un porcentaje de fibra óptimo para ser usado en grouts, según el rango estudiado.
- Contrastar los resultados de los grouts fibroreforzados con grout de referencia sin fibra y con los grouts disponibles comercialmente.

Capítulo 2

2 Marco teórico

2.1 Historia del concreto presforzado

El presfuerzo puede definirse como la imposición de esfuerzos internos a una estructura que son de carácter opuesto a los causados por las cargas de servicio o de trabajo. La teoría del presfuerzo es bastante simple y se ha usado durante muchos años en varios tipos de estructuras. Por ejemplo, los barriles de madera se construyen con cinchos metálicos, que comprimen las dovelas entre sí formando un recipiente hermético con resistencia a las presiones de los líquidos contenidos (Lin, 1963; McCormac & Brown, 2018). Sin embargo, el mismo principio no fue aplicado al concreto sino hasta 1886, cuando P.H. Jackson, un ingeniero de San Francisco, California, obtuvo patentes para atar varillas de acero en piedras artificiales y en arcos de concreto que servían como losas de pisos (Lin, 1963).

Independientemente y hacia 1888, C. E. W. Doehring, de Alemania, aseguró una patente para concreto reforzado con un metal que tenía aplicado un esfuerzo de tensión antes de que fuera cargada la losa. Estas aplicaciones estaban basadas en el concepto de que el concreto, aunque resiste a la compresión, era bastante débil a la tensión, y presforzando el acero contra el concreto pondría a este bajo un esfuerzo de compresión que podría ser utilizado para equilibrar cualquier esfuerzo de tensión producido por cargas vivas o muertas. Estos primeros métodos patentados no tuvieron éxito porque el bajo presfuerzo

producido entonces en el acero, pronto se perdía como resultado de la contracción y flujo plástico del concreto. Puesto que la contracción y flujo plástico finales inducen a menudo a cantidades comparables de acortamiento en el concreto, este alargamiento unitario inicial del acero podría perderse totalmente en el curso del tiempo. Cuando mucho, sólo una pequeña porción del presfuerzo se podría retener, y el método no podía competir económicamente con el refuerzo convencional del concreto.

En 1908, C.R. Steiner, de los Estados Unidos, sugirió la posibilidad de reajustar las barras de refuerzo después de que hubiera tenido lugar cierta contracción y flujo plástico en el concreto, con el objetivo de recuperar algunas pérdidas. En 1925, R. E. Dill, de Nebraska ensayó barras de acero de alta resistencia cubiertas para evitar la adherencia con el concreto. Después de colocar el concreto, se tensaban las varillas y se anclaban al concreto por medio de tuercas. Pero no fueron aplicados estos métodos en ninguna extensión considerable, principalmente por razones económicas (Lin, 1963). El desarrollo moderno del concreto presforzado se le acredita a E. Freyssinet, de Francia, quien en 1928 empezó usando alambres de acero de alta resistencia para el presforzado. Tales alambres, con una resistencia a la ruptura tan elevada como 17,500 Kg/cm² y un límite elástico de más de 12,650 Kg/cm², se presforzaban hasta cerca de 10,600 Kg/cm² creando una deformación unitaria de 0.0050

2.2 Terminología de concreto presforzado

El presfuerzo puede definirse como la imposición de esfuerzos internos a una estructura que son de carácter opuesto a los causados por las cargas de servicio o de trabajo. En la **Fig. 2 a** se muestra una viga de concreto en estado endurecido con reforzada con acero

de manera tradicional, la cual al ser sometida a una carga de servicio tendrá deflexiones cóncava hacia abajo como se ilustra en la **Fig. 2 b**, debido a que la zona en tensión trabaja agrietada y el acero mantiene la estabilidad. En la **Fig. 2 c** se muestra una viga de concreto presforzado, donde el cable fue instalado en la cimbra y tensado antes de colar el concreto. En esta etapa el concreto se endurece y se adhiere al cable, pero aún no existe transferencia de esfuerzos. En la **Fig. 2 d** se muestra que los cables han sido cortados, estos tienen a acortarse y generar una reacción de compresión en la viga por la adherencia entre cable y concreto. Si el cable una excentricidad respecto al eje neutro de la viga, generará un momento y deformación cóncava hacia arriba como se observa en la **Fig. 2 e**. Cuando la viga reciba cargas de servicio (**Fig. 2 f**) estas generarán esfuerzos contrarios a los aplicados por el presfuerzo, y esto provocará que la viga sea aplanada nuevamente. Por esta razón el concreto presforzado tiene deflexiones de cero, o son mínimas y mucho menores que la del concreto reforzado.

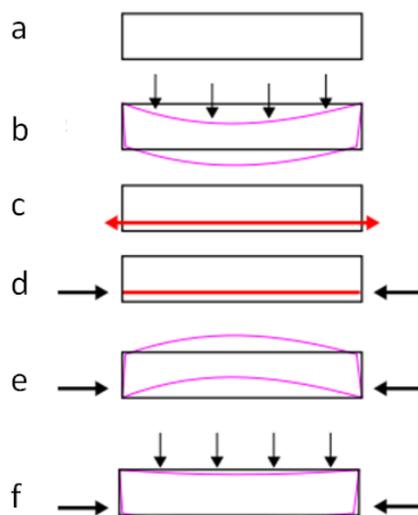


Fig. 2. Comparación del concreto reforzado y el concreto presforzado.

Los dos métodos generales de presforzar son el pretensado y el postensado. El pretensado es donde los tendones de presfuerzo se tensan antes de colar el concreto. Después de que el concreto endureció suficientemente, se cortan los tendones y la fuerza de presfuerzo se transmite al concreto por adherencia (Ver **Fig. 3 a**). En la construcción postensada los tendones se tensan después de colar el concreto y de que éste haya adquirido la resistencia deseada. Se colocan en la cimbra tubos o conductos de plástico o de metal con los tendones sin presforzar dentro de ellos (o que se insertan después) y se cuela el concreto (Ver **Fig. 3 b**). Una vez que el concreto ha endurecido suficientemente, los tendones se estiran y se unen mecánicamente a dispositivos de anclaje en los extremos para mantener a los tendones en su condición estirada. Así, en el postensado, las fuerzas de presfuerzo se transfieren al concreto no por adherencia, sino por apoyo extremo (McCormac & Brown, 2018). En el postensado es posible tener tendones adheridos o no adheridos (Ver **Fig. 4**). Si son adheridos, los ductos suelen ser de aluminio, acero o algún otro forro de metal. Además, es posible usar tubos o varillas de acero o núcleos de caucho que se cuelan junto con el concreto y se retiran unas horas después de haber colado el concreto. Luego que se ha tensado el acero, se inyecta un grout de cemento en el ducto para suministrar adherencia. El grout es también útil para proteger el acero de la corrosión. Si los tendones no van a estar adheridos, deben engrasarse para facilitar su tensado y para protegerlos de la corrosión (Nawy, 2010).

Las estructuras de concreto presforzado son utilizadas para cubrir grandes claros por lo que su uso estratégico es en obras de importancia como puentes carreteros, ferroviarios y otros. En este tipo de estructuras el fenómeno de la corrosión es un factor que se debe cuidar y prevenir para evitar el deterioro del acero de presfuerzo; la corrosión por tensión, ocurrida en estructuras de concreto presforzado es más crítica que la corrosión tradicional

porque conduce a una falla abrupta de los tendones, sin ninguna advertencia y sin una elongación final suficiente (Lin, 1963). Algunas medidas tomadas para la protección del acero de presfuerzo consisten en la densificación de la matriz cementante de los concretos, disminuyendo su relación a/c, utilizando materiales cementantes suplementarios, con el uso de aditivos entre otros. El uso de grouts es otra medida importante ya que es la última defensa del acero de presfuerzo ante la corrosión.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) *Concreto pretensado.* (b) *Concreto postensado*



(a)



(b)

Fig. 4. (a) *Cable no adherido.* (b) *Cable adherido.*

2.3 Reglamentos para Grouts

2.3.1 ACI 351.1R-99, 1999.

Grouts de relleno entre cimientos y bases para el soporte de equipos y maquinaria (ACI 351.1R-99, 1999). Este comité proporciona una visión general de las prácticas actuales de un grout para soportar equipos y maquinaria. Debido a la necesidad de un material estable como relleno, han evolucionado varios materiales y métodos de colocación en un intento por lograr las características necesarias de cambio de volumen. Entre los más utilizados actualmente son los grout de cemento hidráulico, este es una mezcla de cemento hidráulico, agregado, agua y aditivos.

Estos grouts pueden ser proporcionados y mezclados en campo, o premezclados de fábrica. Desde principios de la década de 1950, los grouts comerciales se han premezclado y empaquetado en fábrica. Los materiales empaquetados contienen una mezcla de agregado, cemento y aditivos y solo requieren la adición de agua en el campo. El uso de un grout empaquetado y premezclado resolvió muchos problemas de campo causados por lotes imprecisos y agregados o cementos pobres o muy variables. Hoy en día, hay numerosos grouts empaquetados y premezclado de amplio uso.

Esta información de grouts también puede ser apropiada para otros tipos de aplicaciones en las que se requiere llenar el espacio entre los elementos de carga, como debajo de las placas base de la columna o en las juntas de concreto prefabricado. También es adecuada para un grout de relleno para pretensados, pero con ciertos requisitos o limitaciones extras, como las limitaciones sobre los iones de cloruro, como se indica en ACI 318 (ACI 318S-14, 2014).

2.3.2 ACI 222.2R-01, 2001.

Corrosión de aceros de pretensado (ACI 222.2R-01, 2001, p. 2). Este informe refleja la comprensión actual de la corrosión de los aceros de pretensado utilizados en concreto. El informe incluye un capítulo donde expone las propiedades que debe cumplir el grout de relleno para este tipo de construcción. El grout de cemento para postensados se define como aquel que une al acero al concreto circundante y proporciona protección contra la corrosión para el acero. El grout de cemento es una barrera para la penetración de humedad y cloruros, y produce un ambiente alcalino para el tendón. Un grout óptimo para el postensado combina propiedades en estado fresco apropiadas para la protección contra la corrosión. Las propiedades en estado fresco del grout influyen en qué tan bien el grout llena el conducto. La protección contra la corrosión provista por el grout se vuelve ineficaz si el conducto se llena solo parcial o interrumpidamente. Estas situaciones pueden provocar corrosión severa. La presencia de huecos o discontinuidades también puede permitir el movimiento de humedad y cloruros a lo largo del tendón. Las propiedades importantes de grout en estado fresco se enumeran a continuación.

- **Fluidez:** La fluidez es una medida de qué tan bien fluye o bombea un grout. La fluidez insuficiente puede conducir a dificultades de colocación, bloqueos y groutado incompleto. La fluidez excesiva puede conducir a la formación de huecos cerca de las crestas del ducto en los cambios de dirección por momentos negativos y a un groutado incompleto de la sección transversal. La fluidez del grout también influye en la capacidad del grout para llenar el espacio entre los filamentos de un cable de múltiples torones.

- **Resistencia al sangrado:** La resistencia al sangrado es muy importante en los grouts para postensados. A diferencia del concreto donde el agua de sangrado puede evaporarse, el agua de sangrado en los conductos agrupados tiende a migrar a puntos altos en el conducto, formando lentes de sangrado y huecos. Finalmente, el agua de sangrado se reabsorberá en el grout, dejando un vacío. Los lentes y los huecos de sangrado son un problema particular en los conductos con cambios significativos en la elevación.
- **Cambio de volumen:** La reducción del volumen o la contracción en el estado plástico puede provocar vacíos, por lo que debe minimizarse. En algunos casos, puede ser deseable que el grout en estado plástico sea ligeramente expansivo para compensar la contracción y posiblemente llenar los vacíos resultantes del aire atrapado o del agua de sangrado.
- **Tiempo de fraguado:** Los grouts de fraguado rápido tienen un tiempo de fluidez insuficiente, lo que dificulta la colocación y genera grouteado incompleto. En la mayoría de los casos, es deseable reducir el contenido de agua para disminuir la permeabilidad y reducir el agua de sangrado. La protección contra la corrosión proporcionada por el grout está relacionada principalmente con su permeabilidad. La baja permeabilidad disminuirá la entrada de humedad y cloruros. La permeabilidad del grout, como el concreto, puede reducirse disminuyendo la relación agua-cemento (A/C) y mediante el uso de aditivos minerales, como cenizas volantes y humo de sílice. La reducción de A/C puede requerir el uso de aditivos reductores de agua de alto rango para proporcionar suficiente fluidez.

La selección de las proporciones y aditivos adecuados para grout requiere una cuidadosa consideración de las propiedades en estado fresco y la protección contra la corrosión. La información sobre las proporciones de la mezcla y las especificaciones de la guía para los grouts para el postensado se proporcionan en la Especificación de la guía PTI para el rejuntado de estructuras postensadas (1997) y en el informe de la Sociedad de Concreto "Puentes post tensados unidos durables" (1996).

2.3.3 PTI, Grouts, 2013.

Especificaciones para grout de estructuras postensadas (PTI Committee on Grouting Specifications, 2001, 2013). El reglamento del Instituto de Post-Tensado, es un excelente recurso para el diseño de grouts de postensados. En el capítulo 2, menciona que los ingredientes de los grouts destinados a ser utilizados en tendones postensados se limitarán a los siguientes:

- Cemento Portland.
- Aditivos minerales o materiales cementosos suplementarios (limitados a cenizas volantes, escoria de alto horno y humo de sílice sin densificar).
- Aditivos químicos.
- Agua.
- Se podrá utilizar agregado fino, pero con ciertos requisitos.

En el capítulo 3 describe cuatro clases de grout que se pueden usar para la mayoría de las aplicaciones de postensado. Estas cuatro clases de grout y sus condiciones de exposición recomendadas son:

- Clase A: No agresivo: interior o exterior no agresivo.
- Clase B: Agresivo: sujeto a ciclos húmedos / secos, ambiente marino, sales de deshielo.
- Clase C: No agresivo o agresivo (premezclado).
- Clase D: Determinada por el ingeniero.

Para cada clase de exposición especifica un rango de cantidades de cemento y de materiales cementantes suplementarios, y las cantidades máximas de aditivos. También especifica la relación agua-cemento máxima de 0.45 para todas las clases. Se permitirá el uso de agregados y rellenos inertes en grout de Clase D si esos materiales adicionales y sus proporciones aproximadas se identifican claramente y si se cumplen todos los requisitos de rendimiento en la especificación para lechadas de Clase D. Los agregados, si se usan en grouts de Clase D para construcción postesada, deberán tener un tamaño máximo de 1 mm (0.04 pulg.) Para facilitar el movimiento del grout a través del conducto y proporcionar un relleno total de los elementos de prestensado. Deben cumplir con todos los requisitos de ASTM C33 / C33M, excepto la gradación. Los materiales cementantes suplementarios y los aditivos químicos no deben contener sulfatos. Se permitirán materiales adicionales en los grouts de Clase D si esos materiales adicionales y sus proporciones se identifican claramente y si se cumplen todos los requisitos de rendimiento para los grouts de Clase D en la especificación.

2.4 Permeabilidad

Como se mencionó anteriormente, los grouts utilizados en estructuras postesadas expuestas a condiciones del tiempo u otras condiciones severas de exposición deben ser

casi impermeables. La permeabilidad es la cantidad de agua que migra a través del concreto, mientras que el agua está bajo presión o la habilidad del concreto en resistir a la penetración del agua u otra sustancia (líquidos, gases o iones) (Kosmatka, 2004).

La permeabilidad total del concreto al agua es función de:

1. Permeabilidad de la pasta
2. Permeabilidad y la granulometría del agregado
3. Calidad de la pasta y de la zona de transición del agregado
4. Proporción relativa de pasta y agregado.

La disminución de la permeabilidad aumenta la resistencia al congelamiento y deshielo del concreto, resaturación, penetración de sulfatos y de iones cloruro y otros ataques químicos. La permeabilidad de la pasta es particularmente importante pues la pasta cubre todos los componentes en el concreto. La permeabilidad es afectada por la relación agua-cemento, grado de hidratación del cemento y periodo del curado húmedo. Un concreto de baja permeabilidad requiere una relación agua-cemento baja y un periodo de curado adecuado.

Capítulo 3

3 Metodología Experimental

3.1 Descripción de Materiales

3.1.1 Cemento portland

El cemento utilizado en este estudio fue tipo CPO-40 (Cemento Portland Ordinario clase resistente 40 N/mm²), según como lo describe la norma NMX-C414 (NMX-C414-ONNCEE-2004, 2009). Este cemento fue proporcionado a granel por una planta de cemento de Monterrey. El cemento fue empacado tras su recepción en bolsas de plástico y en sacos para su protección contra la humedad, y se mantuvo almacenado en bodega sobre estantes de madera para alejarlo del suelo. Se le realizaron pruebas de caracterización físicas y químicas para verificar el tipo de cemento y su reactividad, y se calculó su densidad para realizar el diseño de mezclas de grout por volúmenes absolutos. Fue incorporado a las mezclas en masa con una balanza de 0.1 g de precisión.

3.1.2 Agregado fino

Se utilizó un agregado fino, de tipo calizo triturado, disponible en la zona metropolitana de Monterrey. Este agregado fue utilizado sin ningún procesamiento posterior al de su fabricación, y se le realizaron pruebas de caracterización para conocer su distribución de tamaños de partícula, módulo de finura, peso seco suelto, peso seco varillado, densidad

aparente, y porcentaje de absorción. Estos datos eran necesario para el diseño de mezclas grouts. También monitoreó la humedad de obra cada día que se realizaron mezclas para realizar correcciones de agua de mezclado. Fue incorporado a las mezclas en masa con una balanza de 0.1 g de precisión.

3.1.3 Fibras de basalto

Se utilizaron microfibras de basalto con longitud y diámetros aproximadamente constantes. Fueron incorporadas a las mezclas en masa, con una balanza de precisión de 0.0001 g porque que eran cantidades muy pequeñas. En la **Tabla 2** se presentan las propiedades físicas y mecánicas especificadas según los fabricantes.

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de basalto

Fi- bra	Diáme- tro (μm)	Longi- tud (mm)	Elonga- ción (%)	Densidad (g/cm^3)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la Tensión (MPa)	Absor- ción de agua (%)
FB	13 a 15	24	3.1-3.2	2.70	93-110	2800-4800	<0.5

3.1.4 Aditivos utilizados

Para el mejoramiento de las propiedades de los grout se utilizaron dos aditivos, un aditivo reductor de la contracción y un aditivo superfluidificante, los cuales se describen a continuación.

3.1.4.1 Aditivo Superfluidificante (SF)

El fabricante lo define como un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante, formulado con la más reciente tecnología en agentes dispersantes base policarboxilato. Está diseñado especialmente para dar alta fluidez y reducción de agua. Cumple con la norma ASTM-494 tipo A y F como reductor de agua de alto rango. No contiene iones cloruros adicionados que puedan promover la corrosión en el concreto.

Información técnica

- Apariencia: Líquido color ámbar
- Densidad: 1.11 g/cm³

Instrucciones de uso

- Este aditivo es dosificado en un rango de 4 a 15 cm³/kg de cemento.
- Adicione a su diseño de mezcla toda el agua y homogenice materiales.
- Posteriormente adicione directamente el aditivo en la dosis establecida (4 a 7 cm³/kg de cemento dependiendo del diseño y aplicación) y proceda a mezclar durante 5 a 10 minutos.

3.1.4.2 Aditivo reductor de contracción (RC)

El fabricante lo describe como un aditivo líquido listo para usar, específicamente diseñado para reducir la contracción por secado y el consecuente agrietamiento en el concreto o mortero. Este aditivo actúa directamente sobre los mecanismos causantes de la contracción, en el momento en que se produce la hidratación del cemento, reduciendo la tensión capilar del agua en el poro del concreto. Esta acción reduce substancialmente la

contracción por secado. No contiene adición de cloruros y no promueve la corrosión del acero.

Información técnica

- Color: Líquido incoloro
- Densidad: 0.97 +/- 0.02 g/ml

Instrucciones de uso

Para reducir la contracción emplear una dosis del 1% al 2% respecto al peso del cemento. En muchos casos la dosis recomendada para optimizar el efecto del aditivo es del 2% del peso del cemento.

3.1.5 Grouts en polvo comerciales

Con el objetivo de comparar los grouts de laboratorio se hará uso de dos grouts comerciales que suelen usarse en aplicaciones de grout inyectado en vainas de presfuerzo.

3.1.5.1 Grout Comercial 1 (G-1)

El fabricante lo define como un mortero listo para uso en procesos constructivos generales, de consistencias fluida y semifluida, compuesto de cemento, agregados de granulometría controlada, aditivos fluidificantes y reductores de agua adecuadamente dosificados para controlar los cambios de volumen. Cumple con los estándares de la Especificación para Grout sin Contracción del Cuerpo de Ingenieros CRD C621 y con la Especificación estándar para Grout de cemento hidráulico empaquetado en seco y sin contracción ASTM C1107 (ASTM C1107/C1107M – 08, 2008). Es comercializado en sacos de 22 kg,

y para su mezclado el fabricante propone 3.5 litros de agua por saco para una consistencia fluida, y el rendimiento especificado de la mezcla es de 12 litros por saco.

3.1.5.2 Grout comercial 2 (G-2)

El fabricante lo define como un grout que está diseñado para usos donde se requiere un alto desempeño en resistencias, características de expansión positiva y sin manchas, además de ser extremadamente fluido. Contiene solamente agregados naturales y un aglomerante cementicio expansivo. Una vez curado conserva el aspecto similar al concreto. También menciona que cumple con los requerimientos CRD C621 y ASTM C1107 (ASTM C1107/C1107M – 08, 2008). Es comercializado en sacos de 22.7 kg, y recomienda 4.5 kg de agua por saco para consistencia líquida, y el rendimiento especificado de la mezcla es de 13 litros por saco.

3.2 Métodos y ensayos

3.2.1 Caracterización del Cemento y Grouts Comerciales.

Los siguientes métodos de ensayo se emplearon para determinar las características físicas y químicas del cemento y los grout comerciales utilizados en esta investigación.

3.2.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Esta técnica de caracterización fue utilizada para determinar la composición química del cemento y los grouts comerciales. Para verificar el tipo de cemento utilizado, se compararon sus porcentajes de óxidos con los descritos en la norma ASTM C150 (ASTM C150/C150M – 15, 2015). En esta técnica las muestras son bombardeadas con protones

de alta energía en forma de rayos X, que desplazan los electrones de capas internas del átomo, haciendo que los electrones externos ocupen los sitios vacantes emitiendo una radiación característica del elemento. La intensidad de una línea fluorescente de un elemento depende de la concentración del mismo, y a través de esta se calcula en porcentaje los óxidos presentes en la muestra. El equipo utilizado en esta técnica fue uno del modelo Epsilon 3 de PANalytical.

3.2.1.2 Picnometría de desplazamiento de gas

Este ensayo fue utilizado para determinar la densidad absoluta del cemento y de los grouts comerciales. La picnometría de gas es reconocida como una de las técnicas más confiables para obtener un volumen y densidad reales, absolutos y aparentes. Esta técnica no es destructiva, ya que utiliza el método de desplazamiento de gas para medir el volumen. Los gases inertes, como el helio o el nitrógeno, se utilizan como medio de desplazamiento. Los cálculos de densidad utilizando el método de desplazamiento de gas son mucho más precisos y reproducibles que el método tradicional de desplazamiento de agua de Arquímedes. Por lo tanto se puede considerar más preciso que el método ASTM C188 (ASTM C188 – 09, 2009) donde se utiliza desplazamiento de Keroseno para calcular la densidad del cemento.

3.2.1.3 Distribución y tamaño de partícula (DTP)

Esta técnica se empleó para conocer el tamaño máximo y promedio de las partículas y la distribución de éstas, tanto del cemento como de los grouts comerciales. En la técnica un rayo láser incide en una suspensión de la muestra en alcohol isopropílico, detectando

los tamaños de las partículas de la muestra. El equipo empleado fue del modelo Microtrac S3500.

3.2.2 Caracterización del Agregado Fino

3.2.2.1 Tamaño de partícula por tamizado

A este se le realizó la caracterización de los tamaños de partículas por medio de tamizado según como lo describe el procedimiento de la norma NMX-C-077-1997-ONNCCE, con los datos obtenidos se procedió a calcular el módulo de finura (M.F) según como lo especifica la norma.

3.2.2.2 Densidad y absorción

Se determinó la densidad aparente de la arena y su porcentaje de absorción según los procedimientos de la norma NMX-C-165-ONNCCE-2014. También se calculó el peso suelto seco y el peso suelto varillado seco.

3.2.3 Diseño de mezcla de grout

Los grouts de laboratorio se diseñaron de acuerdo con los requerimientos especificados la norma ASTM C 1107 y el reglamento para grouts del Instituto de Postensados (PTI). La fluidez se tomó como punto de partida para el diseño. Según la norma ASTM C939 la fluidez recomendada en grouts es de 125 a 140%, por lo que se seleccionó 130% como fluidez de diseño. Para obtener la fluidez requerida se analizó el efecto de cada material en la fluidez, los cuales se describen en las siguientes secciones.

3.2.3.1 Influencia del Agua y el Aditivo Superfluidificante en la fluidez

En la **Tabla 3** se presentan los resultados de dos series de pastas de cemento, la primera con solamente agua y cemento y la segunda agregando el aditivo superfluidificante (ASF). Se utilizó la cantidad mínima de ASF que recomienda en fabricante de $4 \text{ cm}^3/\text{kg}$ de cemento. Se calculó la densidad del aditivo y fue de $1.10 \text{ cm}^3/\text{kg}$, de manera que la dosificación mínima corresponde a 0.44% del peso de cemento. Las relaciones agua-cemento (A/C) de la serie con ASF fueron más bajas para que fueran medibles en la mesa de fluidez, además porque este aditivo es un reductor de agua de alto rango y es posible hacer una pasta de cemento con relaciones A/C muy bajas.

Tabla 3. Cantidades y proporciones de material para pastas de cemento

Pastas	Nombre	Cemento (kg/m^3)	Agua Rx (kg/m^3)	ASF (kg/m^3)	A/C	ASF/C
Cemento + Agua	P-28	1,645.09	460.63	--	0.28	--
	P-32	1,543.52	493.93	--	0.32	--
	P-36	1,453.77	523.36	--	0.36	--
	P-40	1,373.87	549.55	--	0.40	--
	P-41	1,355.25	555.65	--	0.41	--
Cemento + Agua + ASF 0.44%	P-20-44	1,894.41	378.88	8.34	0.20	0.44%
	P-21-44	1,859.19	390.43	8.18	0.21	0.44%
	P-22-44	1,825.25	401.56	8.03	0.22	0.44%
	P-23-44	1,792.54	412.28	7.89	0.23	0.44%

Estas pastas se realizaron con el objetivo de obtener la fluidez en función de la relación A/C, y construir las gráficas de porcentaje de fluidez vs. relación agua-cemento que se ven en la Fig. 5. Esto se realizó mediante la utilización de la mesa de fluidez, cumpliendo con los requisitos de mezclado para pasta de cemento de ASTM C305 [40] y el ensayo de fluidez de ASTM C230 [38] con 25 golpes en 15 segundos.

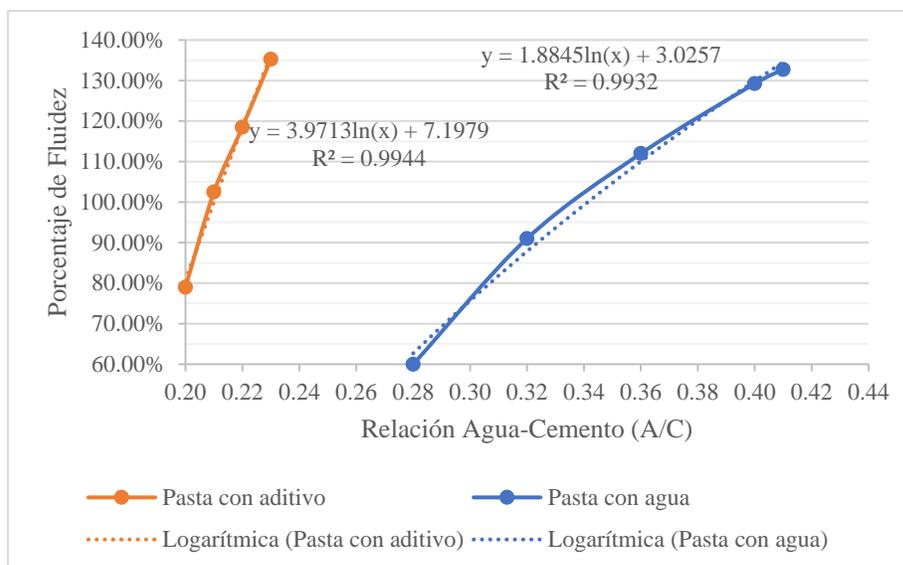


Fig. 5. Relación entre %Fluidez, A/C y ASF a 0.44%

Como se puede observar en la **Fig. 5**, el porcentaje de fluidez en la pasta de cemento en función de la relación agua-cemento tiene una tendencia logarítmica descrita por la Eq. (1).

$$\%F_{(p)} = 1.8845 * \ln(A/C) + 3.0257 \quad (1)$$

La fluidez en la pasta de cemento con 0.44% de aditivo SF de igual manera tiene una tendencia logarítmica y es descrita por la Eq. (2).

$$\%F_{(p_{0.44})} = 3.9713 * \ln(A/C) + 7.1979 \quad (2)$$

3.2.3.2 Influencia de arena en la fluidez

Se realizaron mezclas con A/C=0.40, ASF=0.44%, y diferentes relaciones arena-cemento (n). La fluidez teórica que tendría la pasta con estas relaciones A/C y cantidad de aditivo se puede calcular como se muestra en la Eq. (3).

$$\%F_{(p_{0.44})} = 3.9713 * Ln(0.40) + 7.1979 = 356\% \quad (3)$$

Esta pasta es la mezcla de referencia cuando n=0.00, para conocer la influencia de la arena se realizaron morteros con diferentes “n”, estos se presentan en la **Tabla 4**. Las relaciones arena-cemento inferiores a 2.90 eran demasiado fluidas para medirlas en la mesa de flujo, por lo que la primera relación “n” comienza en 2.90.

Tabla 4. Morteros con diferentes relaciones arena-cemento (n).

Morteros	Nombre	Cemento (kg/m ³)	Agua Rx (kg/m ³)	ASF (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	A/C	ASF/C	n
Cemento + Agua + ASF 0.44% + Arena	P-40-44	1,366.37	546.55	6.01	0.00	0.40	0.44%	0.00
	M-2.90	540.09	216.03	2.38	1,566.25	0.40	0.44%	2.90
	M-3.03	525.83	210.33	2.31	1,593.27	0.40	0.44%	3.03
	M-3.87	449.22	179.69	1.98	1,738.48	0.40	0.44%	3.87
	M-4.65	395.69	158.28	1.74	1,839.96	0.40	0.44%	4.65

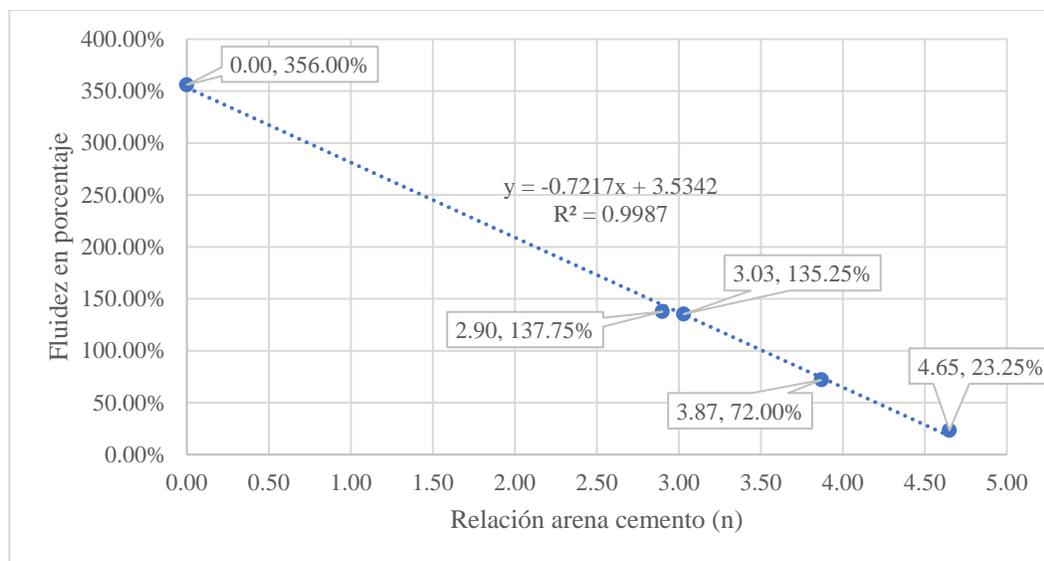


Fig. 6. *Fluidez en morteros con A/C=0.40 y ASF=0.44% y diferentes n*

Como se puede ver en la **Fig. 6**, La influencia de la arena en la fluidez de morteros tiene una tendencia lineal negativa representada por la Eq.

$$\%F_{(mortero)} = -0.7217 * n + 3.5342 \quad (4)$$

A partir de esta ecuación se despeja para “n” y se evalúa para una fluidez de 130%.

$$n = \frac{1.30 - 3.5342}{-0.7217} = 3.10 \quad (5)$$

Se realizó una mezcla de prueba con esta relación arena cemento y resultó en una fluidez de 115.12%. Para encontrar un nuevo valor de “n” se interpoló linealmente para la fluidez de 130% entre el punto del gráfico (n=3.03, 135.25%) y la mezcla de prueba de (n=3.10, 115.12%), resultando en un n=3.05, al hacer la mezcla de prueba se obtuvo una fluidez de 129.5%, que se considera aceptable, por lo tanto la relación arena-cemento a utilizar será de 3.05. Las proporciones se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. *Proporciones de materiales para fluidez de 130%*

Nombre	Cemento (kg/m ³)	Agua Rx (kg/m ³)	ASF (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	A/C	ASF/C	n	Fluidez
M-3.05	523.70	209.48	2.30	1,597.30	0.40	0.44%	3.05	130.00%

3.2.3.3 Influencia del aditivo reductor de la contracción (ARC)

Para evaluar la influencia del ARC en la fluidez, se adicionó un contenido de 2% respecto al peso del cemento, que es el recomendado según el fabricante. Se hizo una mezcla de prueba con A/C=0.40, ASF=0.44%, n=3.05 y ARC=2%, y se obtuvo una fluidez de 135.75%. Como se vio en la sección 3.2.3.2 la fluidez que tenía esta mezcla sin ARC era de 130%, por lo tanto, el ARC aumenta la fluidez en 5.75%. Las proporciones de materiales se muestran en la

Tabla 6. *Proporciones de materiales mezclas sin/con ARC*

Materiales	M-3.05	M-3.05-2
Cemento (kg/m ³)	523.70	518.11
Agua Rx (kg/m ³)	209.48	207.24
ASF (kg/m ³)	2.30	2.28
ARC (kg/m ³)	0.00	10.36
Arena (kg/m ³)	1,597.30	1,580.23
A/C	0.40	0.40
ASF/C	0.44%	0.44%
ARC/C	0.00%	2.00%
n	3.05	3.05
Fluidez	130.00%	135.75%

3.2.3.4 Influencia de las fibras de basalto en la fluidez

Para determinar la influencia de la fibra de basalto en la fluidez, se tomó como referencia la mezcla con $A/C=0.40$, $ASF=0.44\%$, $n=3.05$ y $ARC=2.00\%$, que como se mencionó en la sección 3.2.3.3 tiene una fluidez de 135.75%. Para construir el gráfico de la Fig. 7 se hicieron mezclas con aumentos de 0.25% de fibra respecto al volumen total de mezcla. El 0.25% de 1,000 L de mezcla, equivale a 2.50 L, y la fibra tiene una densidad de 2.67 kg/L, entonces 2.50 L equivale a 6.675 kg de fibra, entonces la fibra tendrá ese aumento en masa en cada mezcla. Estos datos se presentan en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Proporciones de materiales con fibra variable

Materiales	MF-0.00%	MF-0.25%	MF-0.50%	MF-0.75%	MF-0.10%
Cemento (kg/m ³)	518.11	516.81	515.52	514.22	512.93
Agua Rx (kg/m ³)	207.24	206.73	206.21	205.69	205.17
ASF (kg/m ³)	2.28	2.27	2.27	2.26	2.26
ARC (kg/m ³)	10.36	10.34	10.31	10.28	10.26
Arena (kg/m ³)	1,580.23	1,576.28	1,572.33	1,568.38	1,564.43
Fibra	0.00	6.68	13.35	20.03	26.70
A/C	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
ASF/C	0.44%	0.44%	0.44%	0.44%	0.44%
ARC/C	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%
n	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05
F/C	0.00%	1.29%	2.59%	3.89%	5.21%
Fluidez	135.75%	81.75%	57.00%	43.50%	33.00%

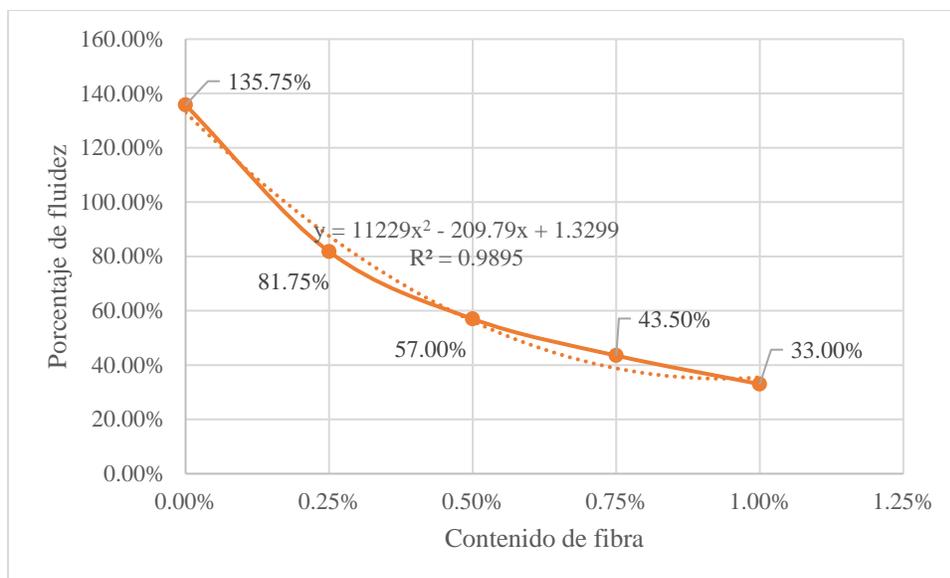


Fig. 7. Influencia de las fibras de basalto en la fluidez

La Fig. 7 muestra una ecuación de tendencia que se muestra en la Eq. (6), esta describe que a la fluidez del mortero sin fibra se le resta la fluidez que se pierde con la adición de la fibra. El decremento de fluidez es proporcional a la cantidad de fibra añadida, pero no es una relación lineal como en el caso de la arena, sino que el decremento es una relación cuadrática.

$$\%F_{(m+f)} = 11,229x^2 - 209.79x + 1.3299 \quad (6)$$

3.2.3.5 Aditivo Superfluidificante (ASF) óptimo.

Como se mencionó anteriormente el ASF está al mínimo recomendado por el fabricante ($7 \text{ cm}^3/\text{kg}$ de cemento ó 0.44%), por lo que se espera que al adicionar más aditivo se alcance mayor fluidez, pero esta será constante cuando el ASF llegue el punto de saturación, y adicionar una cantidad mayor a esta puede causar signos de segregación en la mezcla. El máximo contenido recomendado por el fabricante es de $15 \text{ cm}^3/\text{kg}$ de cemento, que a una densidad de $1.10 \text{ kg}/\text{cm}^3$ corresponde a 1.65% del peso del cemento. Debido a

que se está utilizando el aditivo reductor de la contracción (ARC) esta cantidad máxima puede verse modificada y comenzar a segregarse antes.

La mezcla de referencia fue la del contenido mínimo de ASF de $4.00 \text{ cm}^3/\text{kg}$ (0.44%) con un contenido de fibra constante de 0.50%, esta corresponde a una fluidez de 57.00% como se vio en la Tabla 7. Se usó esta mezcla como referencia ya que se encuentra bastante por debajo de la fluidez máxima medible en la mesa de flujo, y los incrementos de fluidez causados por el aumento de ASF seguirán siendo medibles. Este punto con ASF mínimo es el primero en el gráfico de porcentaje de fluidez versus cantidad de ASF (0.44%, 57.00%) presentado en la Fig. 8. Para los siguientes puntos del gráfico se realizaron incrementos de 0.75 cm^3 , o de 0.083% de kg de ASF por cada kg de cemento. Las proporciones de las mezclas se presentan en la Tabla 10 y los resultados de fluidez en la Fig. 8.

Tabla 8. *Proporciones de materiales con aditivo variable*

Material	MF-0.50%-0.44	MF-0.50%-0.53	MF-0.50%-0.61	MF-0.50%-0.69
Cemento (kg/m^3)	515.52	515.30	515.11	514.91
Agua Rx (kg/m^3)	206.21	206.12	206.04	205.97
ASF (kg/m^3)	2.27	2.73	3.14	3.55
ARC (kg/m^3)	10.31	10.31	10.30	10.30
Arena (kg/m^3)	1,572.33	1,571.67	1,571.08	1,570.48
Fibra	13.35	13.35	13.35	13.35
A/C	0.40	0.40	0.40	0.40
ASF/C	0.44%	0.53%	0.61%	0.69%
ARC/C	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%
n	3.05	3.05	3.05	3.05
F/C	2.59%	2.59%	2.59%	2.59%
Fluidez	57.00%	68.00%	72.75%	73.50%

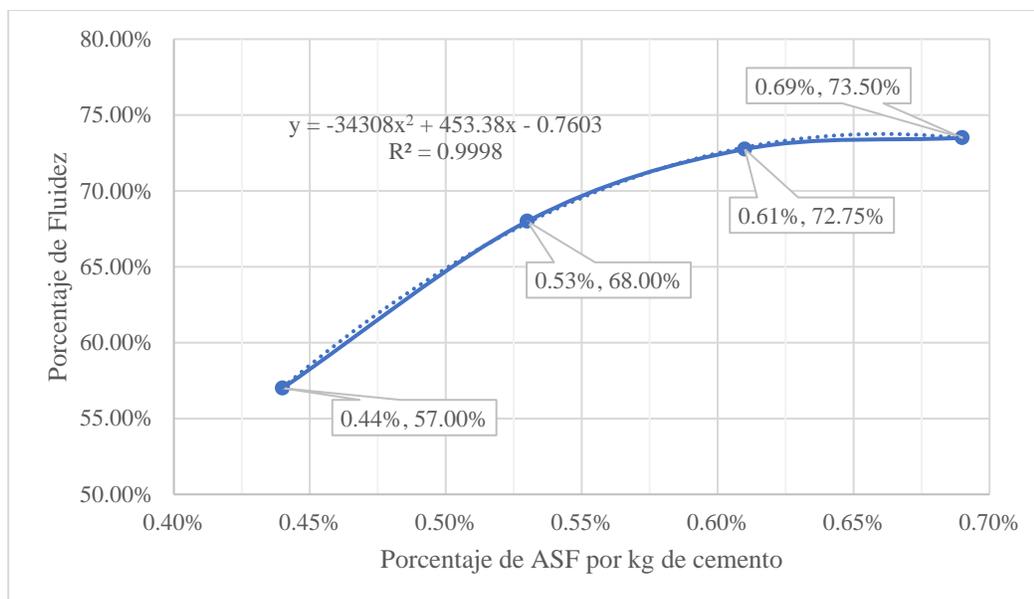


Fig. 8. Influencia del ASF en la fluidez.

A un contenido de 0.69% de ASF se comenzó a notar un poco de segregación, y además que la fluidez casi se mantuvo constante, por lo tanto, se tomará como punto de saturación el contenido anterior de 0.61%.

En la Fig. 8 se observa que la cantidad de aditivo tiene una tendencia cuadrática y es descrita con la Eq. (7), dentro del rango de 0.44% a 0.69% de ASF.

$$\%F_{(m+f)} = -34308 (ASF)^2 - 209.79 (ASF) + 1.3299 \quad (7)$$

3.2.3.6 Pasta de cemento con ASF óptimo y ARC

El incremento en la fluidez por causa del aditivo tiene impacto por la influencia de este con el agua y la pasta de cemento, por lo que es necesario ajustar la ecuación de la pasta de cemento con estos incrementos de fluidez. Como se vio anteriormente cuando el ASF está al mínimo la fluidez la define con la Eq. (2). Y Cuando la relación A/C= 0.40 y ASF es de 0.44% la fluidez de la pasta se estimó de 356%.

Cuando se utiliza el ASF al máximo (0.61%) la fluidez es de 72.75% y cuando el ASF está al mínimo (0.44%), la fluidez es de 57.00%, por lo que el aumento en la fluidez es de 15.75%. Ese aumento de fluidez es representativo del aumento de fluidez en la pasta, por lo tanto, la fluidez total de la pasta sería de 371.75% (356% + 15.75%) que refleja un factor de aumento de 1.0442 (371.75 / 356).

También se describió anteriormente, cuando se adiciona el aditivo reductor de la contracción (ARC=2%) la fluidez aumenta 5.75%, por lo que la fluidez en la pasta debería ser de 377.5% (371.75% + 5.75%) que refleja un factor de aumento de 1.0155 (377.5% / 371.75%).

La Eq. (19) de la pasta con ASF= 0.44% se multiplica por estos factores para hacer la corrección para pasta con ASF=0.61% y ARC=2%.

$$\%F_{(p_{0.61_{RC}})} = [3.9713 * \ln(A/C) + 7.1979] * 1.0442 * 1.0155 \quad (8)$$

$$\%F_{(p_{0.61_{RC}})} = 4.2111 * \ln(A/C) + 7.1979 \quad (9)$$

3.2.3.7 Cantidad de fibra máxima

Para no aumentar el contenido de cemento, la cantidad de fibra que se añadirá a la mezcla será igual a aquella que contrarreste la fluidez extra que se obtuvo con el aumento de ASF al máximo, que corresponde a 15.75%, y a la fluidez que aporta el ARC, que corresponde a 5.75%, es decir que la fluidez que restará la fibra será de 21.50% (15.75% + 5.75%). Esta se puede encontrar con la Eq. (6).

Pero se debe modificar la constante, porque esta ecuación fue construida a partir de datos con el ASF de 0.44%, y ahora se utilizará 0.61%, y al ser esta la única variable que

cambió se le puede sumar directamente los 15.75% de porcentaje de fluidez que agrega este incremento de ASF, de manera que se obtiene la Eq. (11).

$$\%F_{(m+f)} = 11,229x^2 - 209.79x + 1.3299 + 0.1575 \quad (10)$$

$$\%F_{(m+f)} = 11,229x^2 - 209.79x + 1.4874 \quad (11)$$

Para encontrar la cantidad de fibra requerida para que la fluidez del mortero la ecuación se iguala a la fluidez de diseño de 130%

$$\%F_{(m+f)} = 11,229x^2 - 209.79x + 1.4874 = 1.30 \quad (12)$$

$$\%F_{(m+f)} = 11,229x^2 - 209.79x + 0.1874 = 0.00 \quad (13)$$

Al resolver la ecuación cuadrática se obtiene que el porcentaje de fibra debe ser 0.094%.

Se realizó una mezcla de prueba utilizando un contenido de fibra de 0.09% y se obtuvo una fluidez de 132.52%, esto significa que es posible agregar un poco más de fibra si se hacen las correcciones.

Aplicando un factor de corrección 1.0194 (132.52% / 130%), la ecuación queda:

$$\%F_{(m+f)} = (11,229x^2 - 209.79x + 1.4874) * 1.0194 \quad (14)$$

$$\%F_{(m+f)} = 11,446x^2 - 213.86x + 1.516 \quad (15)$$

Al resolver esta nueva ecuación cuadrática que el porcentaje de fibra debe ser 0.10%. Se realizó nuevamente una mezcla de prueba utilizando un contenido de fibra de 0.10% y se obtuvo una fluidez de 130.5%, por lo que se considera la cantidad de fibra adecuada.

3.2.3.8 Ajuste para fluidez a 5 golpes en 3 segundos

Este diseño fue hecho para alcanzar la fluidez a los 25 golpes en 15 segundos, esto para disminuir la incertidumbre del ensayo, pero según lo especifica la norma ASTM C942, el grout debe alcanzar la fluidez alta a los 5 golpes en 3 segundos. Para alcanzar estas recomendaciones se disminuyó la cantidad de arena (n) de 3.05 a 2.34, las otras proporciones se mantuvieron constantes. El porcentaje de fibra máximo cumplió con esta fluidez mínima requerida. En la **Fig. 9** se ilustran las proporciones utilizadas para las mezclas de grout con fibra. Para analizar el efecto de la fibra se realizaron mezclas finales con porcentaje de fibra en 0.00, 0.03, 0.07 y 0.10%.



Fig. 9. Materiales para mezclas de grout con fibras

3.2.4 Mezcla de grouts Comerciales

Para evaluar la eficiencia de los grout de laboratorio se hizo el análisis de dos grouts comerciales, para grout comercial 1 (GC-1) y para grout comercial 2 (GC-2). Se realizaron

las mezclas de acuerdo con las proporciones descritas en la ficha técnica de los fabricantes.

Las cantidades en kg/m^3 según estas especificaciones se presentan en la **Tabla 9**.

Tabla 9. *Proporciones de mezclas de grouts comerciales (GC).*

Mezcla	Cant. Grout (kg)	Cant. Agua (kg)	Volumen de mezcla (L)	Densidad de mezcla (kg/L)
GC-1	22.00	3.50	12.00	2.125
GC-2	22.70	4.50	13.00	2.092

Entonces la relación de agua-grout (A/G) para GC-1 es:

$$\frac{A}{G} = \frac{3.50}{22.00} = 0.1591 \quad (16)$$

Y la relación de agua-grout (A/G) para GC-2 es:

$$\frac{A}{G} = \frac{4.50}{22.70} = 0.1982 \quad (17)$$

3.2.5 Pruebas en estado fresco

3.2.5.1 Fluidez

La fluidez del grout comercial 1 (GC-1) se evaluó con utilizando la mesa de fluidez especificado en ASTM C230. El grout comercial 2 (GC-2) debido a su alta fluidez no pudo ser evaluada con la mesa de fluidez, por lo que se optó a medir su fluidez por medio del cono de flujo y siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C939. En la **Fig. 10** se ilustran ambos métodos. En el grout comercial GC-1 se obtuvo una fluidez de 127%, y el tiempo de flujo del GC-2 fue de 30 segundos.

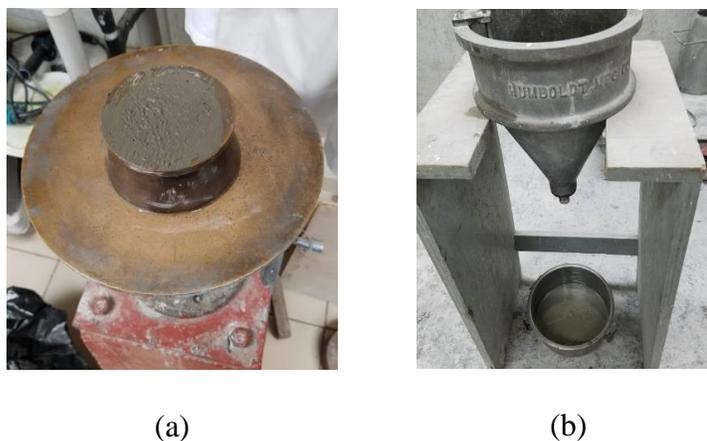


Fig. 10. (a) Mesa de fluidez (b) Cono de flujo

3.2.5.2 Masa unitaria y contenido de aire

Se evaluaron las 2 mezclas de grouts siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C185, utilizando un recipiente de masa y volumen conocido (Ver **Fig. 11**) para determinar su masa unitaria y el contenido de aire, obteniendo el último por diferencia entre el peso volumétrico absoluto (sin aire) y peso volumétrico real (con aire) obtenido en el ensaye. Se determinó la densidad de los polvos y agregados del grout de a través de la prueba del picnómetro, los resultados fueron GC-1= 2.73 y el GC-2= 2.74



Fig. 11. Recipiente de masa y volumen conocidos.

3.2.6 Pruebas en estado endurecido

3.2.6.1 Resistencia a la compresión

Los dos grouts fueron evaluados para determinar su resistencia a compresión, se elaboraron cubos de 50 mm de lado, siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C109, con las modificaciones para los grouts mencionadas en la norma ASTM C942. En la **Fig. 12** se ilustra el ensayo a compresión.



Fig. 12. Ensayo a compresión de cubos de grout

3.2.6.2 Ensayo de contracción por secado

Se realizó el ensayo de retracción por secado como método de evaluar la eficiencia de la fibra para contrarrestar las contracciones, contrastando estos resultados con grouts sin fibra y grouts comerciales. Este ensayo está basado en la norma ASTM C596. En la **Fig. 13** se muestran los especímenes para el ensayo y el aparato medidor.

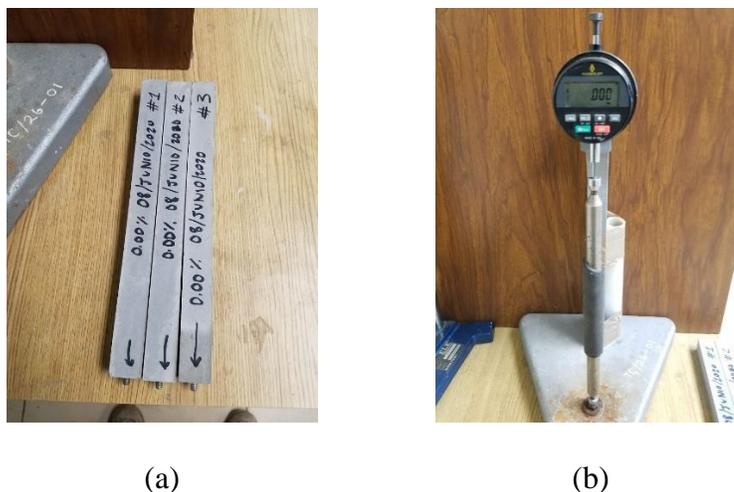


Fig. 13. (a) Barras de retracción por secado. (b) Comparador de longitud.

Este método de ensayo establece un conjunto de condiciones seleccionadas de temperatura, humedad relativa y velocidad de evaporación del ambiente en el que el espécimen de mortero de una composición dada fue sometido por un período especificado de tiempo durante el cual se determinó su cambio de longitud al que se designa como “retracción por secado”.

3.2.7 Pruebas de Permeabilidad

Para las pruebas de permeabilidad se realizaron cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto (Ver **Fig. 14a**) los cuales fueron rebanados por el centro y se cortó una porción cilíndrica de 5 cm de altura a cada lado (Ver **Fig. 14b**) esto para tomar una muestra lo más homogénea y representativa posible, para cada mezcla.



(a)

(b)

Fig. 14. (a) Cilindros de $D=10$ cm $h=20$ cm (b) Cilindros rebanados en porciones de 5 cm de altura

3.2.7.1 Permeabilidad al aire

Para la determinación de la permeabilidad al aire se empleó un equipo comercial, apto para mediciones tanto en condiciones de laboratorio como in situ, de manera no destructiva. El equipo, que se ilustra en la **Fig. 15**, dispone de una celda de doble cámara cilíndrica, de aproximadamente 10 cm de diámetro, unida a una bomba de alto vacío, con sus correspondientes sensores y válvulas comandadas por una central de proceso. La celda se adhiere a la superficie del concreto por el vacío que proporciona la bomba y los sensores miden la pérdida de ese vacío por efecto de la porosidad interna del concreto. La doble cámara evita las corrientes de aire espurias y permite el cálculo del coeficiente de permeabilidad K del concreto de recubrimiento, que se muestra en el visor de la unidad de proceso. El equipo opera de manera automática y en un tiempo menor o igual que 12 minutos se obtiene un valor de la permeabilidad al aire. Diversos estudios informan de la idoneidad de esta técnica y de su muy buena correlación con otros métodos para medir la permeabilidad a los gases (Método de permeabilidad al oxígeno. Cembureau).

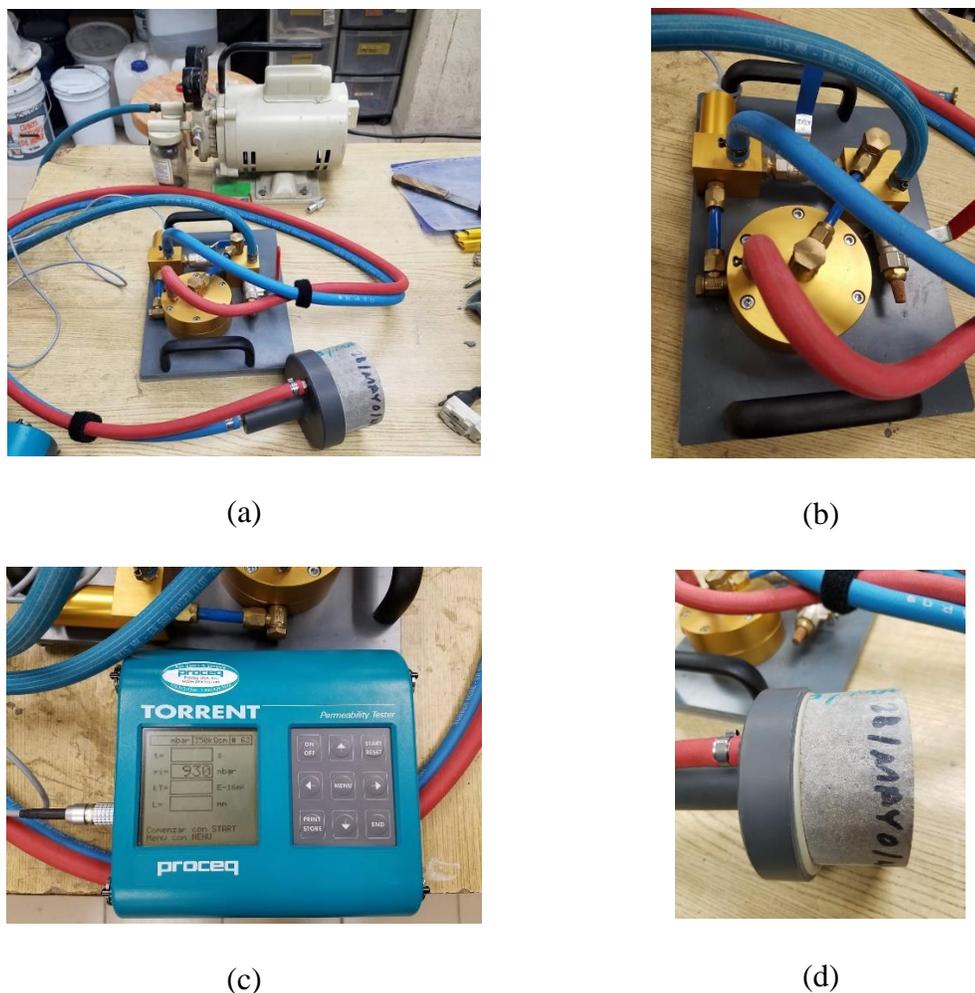


Fig. 15. (a) Aparato de permeabilidad al aire conectado a bomba de vacío. (b) válvulas de control. (c) Central de proceso. (d) Cabezal de doble cámara unido a espécimen.

3.2.7.2 Permeabilidad al agua

Este ensayo cubre las determinaciones de la densidad, el porcentaje de absorción de agua y el porcentaje de vacíos en el concreto endurecido, y se realizó según los procedimientos descritos en la norma ASTM C C642. Este método de ensayo es útil para desarrollar los datos requeridos para realizar las conversiones entre la masa y el volumen de los grout. Los especímenes utilizados son los descritos en la Sección 3.2.7, a los cuales se les obtuvo la Masa seca al horno, Masa saturada después de inmersión en agua, Masa

saturada después de ebullición en agua, Masa sumergida aparente. En la **Fig. 16** se muestra el procedimiento llevado a cabo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 16. (a) Muestras secas al horno. (b) Muestras en saturación. (c) Muestras con agua en ebullición. (d) Muestras con peso sumergido.

3.2.7.3 Permeabilidad rápida a los iones cloruros

Este método de ensayo se realizó para determinar la conductividad eléctrica de los grouts para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones cloruro. Se realizó la prueba según los procedimientos descritos en la norma ASTM C1202, y utilizando los especímenes descritos en la Sección 3.2.7 recubiertos con pintura epóxica en su contorno según como lo describe la norma. Este método de ensayo consiste en monitorear la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de secciones de 50 mm

de espesor de núcleos de 100 mm de diámetro nominal durante un período de 6 horas. Se mantiene una diferencia de potencial de 60 V de corriente directa en los extremos de la muestra, uno de los cuales se sumerge en una solución de cloruro de sodio y el otro en una solución de hidróxido de sodio. La carga total que atraviesa la sección, en coulomb, presenta una relación con la resistencia de la muestra a la penetración de iones cloruro. En la **Fig. 17** se ilustra el procedimiento llevado a cabo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 17. (a) Muestras con pintura epóxica. (b) Muestras colocadas en vacío y saturadas. (c) Preparación de soluciones NaCl y NaOH. (d) Ensayo y monitoreo por 6 h.

3.2.7.4 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Este método de ensayo se realizó para determinar la velocidad de propagación de pulsos longitudinales de ondas de esfuerzos a través los grouts. El ensayo se determinó según

la norma ASTM C597. En esta prueba se generan pulsos de ondas longitudinales de esfuerzos por un transductor electroacústico que se mantiene en contacto con una superficie del concreto bajo ensayo. Después de atravesar el concreto, los pulsos son recibidos y convertidos en energía eléctrica por un segundo transductor localizado a una distancia L del transductor transmisor (Ver **Fig. 18**). El tiempo de tránsito T se mide electrónicamente. La velocidad del pulso se calcula dividiendo L entre T . El grado de saturación del concreto afecta la velocidad de pulso, y este factor debe ser considerado cuando se evalúan los resultados de los ensayos, por lo que se mantuvo la misma humedad en todos los especímenes.



Fig. 18. (a) Especímenes de grout (b) Aparato de velocidad de pulso ultrasónico

Este método es aplicable para estimar la uniformidad y la calidad relativa del concreto; para indicar la presencia de vacíos y grietas.

3.2.7.5 Resistividad eléctrica superficial

Para la medición superficial de la resistividad eléctrica de los grouts, se elaboraron especímenes cilíndricos (Ver **Fig. 19a**), que se curaron en un cuarto con humedad relativa

alta inmediatamente después de ser desmoldados (a 24 horas del colado). Se tomaron las lecturas hasta que las mismas dejaron de variar en un 1%. La medición de la resistividad superficial se realizó según los lineamientos de la norma AASHTO TP95. El equipo utilizado fue un aparato con el arreglo de Wenner de 4 puntas modelo Resipod de Proceq (Ver Fig. 19b).



(a)



(b)

Fig. 19. (a) Especímenes de grout (b) Medición de resistividad eléctrica superficial

Capítulo 4

4 Resultados y discusión

4.1 Pruebas en estado fresco.

4.1.1 Fluidez

En el grout comercial GC-1 se obtuvo una fluidez de 127% en la mesa y fluidez ASTM C230 [38], y el tiempo de flujo del GC-2 fue de 30 segundos en el cono de flujo ASTM C939 [39]. La fluidez de los grouts de laboratorio se definió en el diseño mezclas descrito en la sección 3.2.3.

4.1.2 Masa unitaria y contenido de aire

El volumen absoluto de grout más el volumen de agua, dan como resultado el volumen total de la mezcla, por conveniencia para producir 1 m³ tal como se muestra en la ecuación (18).

$$V_{Grout} + V_{Agua} = 1,000 \text{ Litros} \quad (18)$$

Ya que la densidad del agua se considera 1.00 kg/m³, esta se puede reescribir como su masa y representarla en términos de la relación de agua-grout (A/G), y a su vez se puede sustituir el volumen de grout en términos de su masa y densidad absoluta del grout (D_G). Con estos datos se puede despejar para la masa de grout (G), y así conocer la masa de grout necesario para producir 1 m³ de mezcla sin aire, tal como se muestra en la Eq. (19).

$$G = \frac{1,000}{\frac{1}{D_G} + \frac{A}{G}} \quad (19)$$

El cálculo de las densidades de las mezclas sin aire se presenta en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Densidad sin aire de los grouts comerciales (GC).

Materiales	D ¹ (kg/L)	A/G ²	Cant. Mat. (kg/m ³)	Volumen (L)	Densidad sin aire (kg/L)
GC-1	2.73	--	1,903.31	697.18	
Agua	1.00	0.1591	302.82	302.82	2.2061
TOTAL	--	--	2,206.13	1,000.00	
GC-2	2.74	--	1,775.68	648.06	
Agua	1.00	0.1982	351.94	351.94	2.1276
TOTAL	--	--	2,127.62	1,000.00	

¹Densidad absoluta. ²Relación de agua-grout.

Los cálculos de las densidades con aire de las mezclas se presentan en la **Tabla 11** y también el cálculo de contenido de aire. El GC-1 tiene un mayor contenido de aire que el GC-2. En el ensayo de distribución de tamaño de partículas se encontró que el tamaño promedio de partículas del GC-1 es de 21.43 μm y el del GC-2 es de 236.8 μm, y además una mejor distribución de tamaños de partículas. Por lo que era de esperarse que el GC-2 tuviera menos aire atrapado ya que al tener partículas más pequeñas y tamaños mejor distribuidos hace posible un mejor empaquetamiento.

Tabla 11. Densidad de mezcla con aire atrapado.

Materiales	Densidades (kg/L)
------------	-------------------

	Masa en ensaye (kg)	Volumen de recip. (L)	Sin aire	Con aire	Porcentaje de aire (%)
GC-1	0.8688	0.408	2.2061	2.129	3.49%
GC-2	0.8520	0.408	2.1276	2.088	1.86%

4.2 Pruebas en estado endurecido

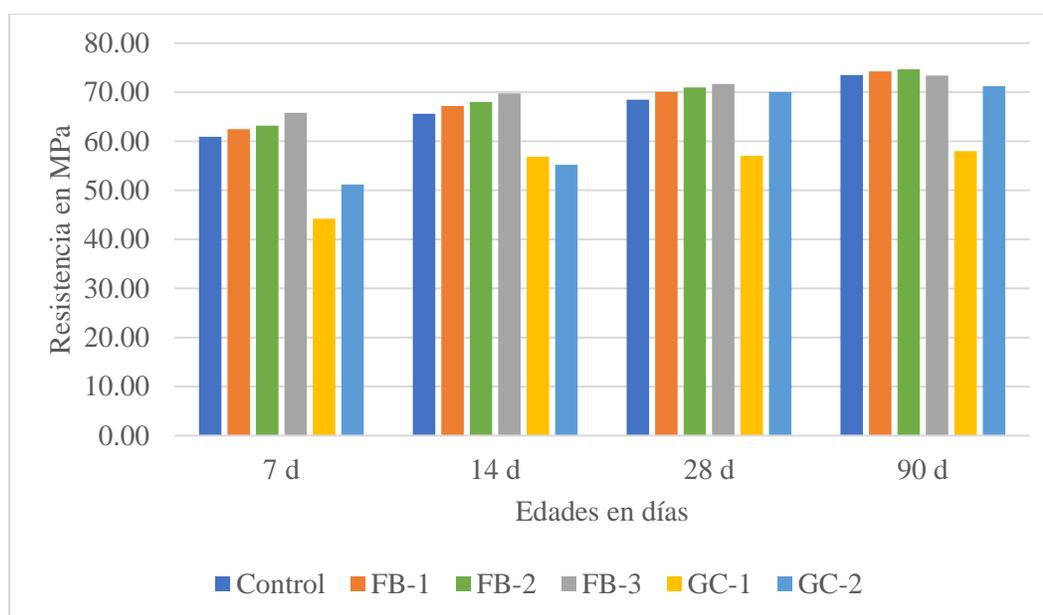
4.2.1 Resistencia a compresión

Los resultados de la resistencia a la compresión y la efectividad (EF) de las muestras de grouts a los 7, 14, 28 y 90 días se dan en la **Tabla 12**. Se puede observar que la incorporación de fibra no modifica significativamente la magnitud de la resistencia a la compresión del grout. La tendencia de la resistencia a la compresión del grout a aumentar con la incorporación de fibra de basalto se puede encontrar dentro de los períodos de curado de 7 a 28 días. Con el aumento adicional de curado de 90 días, se produce el efecto negativo de la fibra de basalto sobre la resistencia a la compresión del grout. Los resultados de la prueba son consistentes con los resultados de estudios anteriores sobre concreto con fibras de basalto (Dias & Thaumaturgo, 2005; Jiang et al., 2014) y morteros con fibras de basalto (Jiang et al., 2016; Ralegaonkar et al., 2018). Además, como se observa en la **Fig. 20**, las resistencias a la compresión de los grouts de laboratorio son superiores que ambos grouts comerciales.

Tabla 12. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión

No. Mezcla	Vf (%)	Resistencia de Compresión (Mpa)							
		7 d		14 d		28 d		90 d	
		Medido (Mpa)	EF (%)	Medido (Mpa)	EF (%)	Medido (Mpa)	EF (%)	Medido (Mpa)	EF (%)
Control	0.00	60.91	--	65.60	--	68.47	--	73.50	--
FB-1	0.03	62.47	2.56	67.20	2.44	70.04	2.30	74.22	0.98
FB-2	0.07	63.18	3.72	68.02	3.69	70.96	3.64	74.64	1.55
FB-3	0.10	65.80	8.02	69.77	6.36	71.66	4.66	73.39	-0.15
GC-1	--	44.22	-27.40	56.84	-13.35	57.00	-16.75	58.00	-21.09
GC-2	--	51.18	-15.97	55.18	-15.88	70.00	2.23	71.21	-3.12

Notas: EF (%) = [(resistencia del grout - resistencia grout de control) / resistencia grout de control] 100%.

**Fig. 20.** Resistencia a compresión a diferentes edades

4.2.2 Contracción por secado

Los resultados de la contracción por secado y la efectividad (EF) de las muestras de grouts a los 7, 14, 21, 28, 56 y 70 días se dan en la **Tabla 13**. Los resultados demuestran que las mezclas con FB tienen una contracción menor en comparación de la mezcla de referencia en diferentes edades, especialmente a edades tempranas. La contracción por

secado de la mezcla de grout con 0.03% de fibra respecto al volumen, a la edad de 7 días y 14 días fue menor que la del grout de mezcla de referencia en un 10.26% y 9.84%, respectivamente. También se puede observar que entre mayor es el contenido de fibra en la mezcla, menor es la contracción por secado exhibida por el grout. Con el aumento de las edades de curado, disminuyó el efecto de FB sobre los comportamientos de contracción de la mezcla. A los 28 días, la influencia de la FB en la contracción del grout fue menos efectiva, y siguió disminuyendo a las edades de 56 y 70 días. Estos resultados del ensayo son consistentes con los resultados de estudios anteriores sobre morteros con fibras de basalto (Jiang et al., 2010), también se puede apreciar el efecto con el aditivo reductor de la contracción (ARC) si se comparan los resultados de las retracciones de las mezclas de control a una misma edad, en los grouts se obtuvo una retracción de 0.031% a los 7 días y Jiang reportó 0.069% para esa misma edad (Ver **Tabla 1**). Esto equivale a una efectividad de reducción de contracción del 55.07% por el uso del ARC. Si se comparan las edades de 14 y 28 días, la efectividad se reduce a 37% y 33%, respectivamente, aunque la efectividad decrece a edades posteriores, aún es considerable el beneficio del ARC. Incluso esta efectividad puede ser aún mayor ya que el grout tiene un contenido más alto de cemento respecto a los morteros de Jiang. Los grouts comerciales tienen contracciones mucho mayores, que incluso superan el 100% de aumento de contracción respecto a la mezcla de control.

Las curvas de contracción por secado se presentan en la **Fig. 20**, y se puede observar que la contracción por secado aumenta con el tiempo de curado para todas las muestras, aumentando más rápidamente en las primeras etapas y disminuyendo en etapas posteriores, tal como era de esperarse según lo reportado (Jiang et al., 2016).

Tabla 13. Mediciones de retracción por secado de grout con FB

No. Mezcla	Vf (%)	Kg/m ³	Contracción por secado (%)					
			7 d		14 d		21 d	
			Med (%)	EF (%)	Med (%)	EF (%)	Med (%)	EF (%)
Control	0.00	-	0.031	-	0.049	-	0.054	-
FB-1	0.03	0.801	0.028	-10.26	0.044	-9.84	0.049	-8.58
FB-2	0.07	1.869	0.026	-16.67	0.042	-13.93	0.047	-12.31
FB-3	0.10	2.670	0.025	-19.87	0.041	-15.98	0.046	-14.18
GC-1	-	-	0.048	52.99	0.103	111.48	0.106	98.01
GC-2	-	-	0.052	65.81	0.112	128.96	0.116	116.42

No. Mezcla	Vf (%)	Kg/m ³	Contracción por secado (%)					
			28 d		56 d		63 d	
			Med (%)	EF (%)	Med (%)	EF (%)	Med (%)	EF (%)
Control	0.00	-	0.059	-	0.060	-	0.061	-
FB-1	0.03	0.801	0.054	-7.95	0.056	-6.67	0.057	-6.66
FB-2	0.07	1.869	0.053	-9.66	0.055	-8.33	0.056	-8.30
FB-3	0.10	2.670	0.052	-11.36	0.054	-10.00	0.055	-9.93
GC-1	-	-	0.118	101.82	0.130	116.44	0.135	120.96
GC-2	-	-	0.143	144.09	0.161	167.56	0.161	164.19

Notas: EF (%) = [(retracción del grout - retracción grout de control) / retracción grout de control] 100%

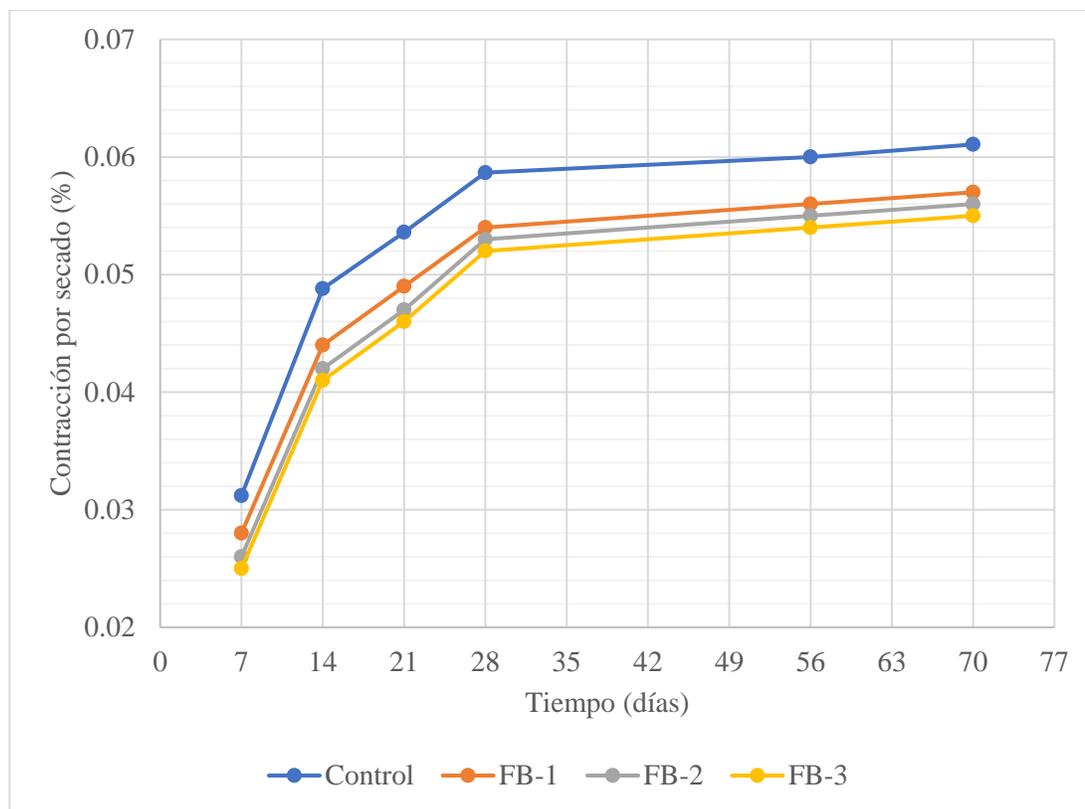


Fig. 21. Retracción por secado de los grouts con FB y control

4.3 Pruebas de permeabilidad

4.3.1 Permeabilidad al aire

Los resultados de los ensayos de permeabilidad al aire se muestran en la **Tabla 14**, estos resultados se evalúan según la constante KT y según las especificaciones del fabricante del aparato se le pueden clasificar por categorías. Todos grouts de laboratorio muestran una permeabilidad muy buena ya que la velocidad con la que el aire pasa a través del espécimen es muy baja, y se nota una mejoría con la adición de fibra respecto a las mezclas sin fibra, pero el grado de precisión del aparato no es lo suficientemente pequeño para determinar qué porcentaje de fibra tiene la menor permeabilidad, pero en la prueba de

permeabilidad a los iones cloruros sí se pudo apreciar ya que es un ensayo más sensible. En los grouts comerciales se puede notar que el GC-1 tiene una permeabilidad mala, y esto es consistente con la prueba de permeabilidad a los iones cloruros.

Tabla 14. Resultados de permeabilidad al aire

Mezcla	KT (10^{-16} m ²)	Categoría
MR-0.00%	0.002	Muy buena
M-0.03%	0.001	Muy buena
M-0.07%	0.001	Muy buena
M-0.10%	0.001	Muy buena
GC-1	1.367	Mala
GC-2	0.163	Normal

4.3.2 Permeabilidad rápida a los iones cloruro (PRCI)

Las normas ASTM C1202 (ASTM C1202 – 10, 2010) y ASHATTO T277 (AASHTO T 277-86, 1990) especifican la clasificación de permeabilidad al cloruro del concreto en base a la carga que pasa a través de la muestraAlgin durante 6 h de período de prueba, como se indica en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Penetrabilidad el ion cloruro basada en la carga pasada (AASHTO T 277-86, 1990; ASTM C1202 – 10, 2010)

Carga pasada (Coulombs)	Penetrabilidad del ion cloruro
>4,000	Alto
2,000-4,000	Moderado
1,000-2,000	Bajo
100-1,000	Muy bajo
<100	Despreciable

Los resultados de la permeabilidad rápida a los iones cloruro de las mezclas de grouts se muestran en la **Tabla 16** y de manera gráfica en la **Fig. 22** . La mezcla de control obtuvo una permeabilidad de 4,433.08 Coulombs que corresponde a una permeabilidad alta según

la clasificación de la **Tabla 15**. Como se mencionó anteriormente, la permeabilidad de la pasta es particularmente importante pues la pasta cubre todos los componentes en la mezcla. La permeabilidad es afectada por relación agua-cemento (a/c), grado de hidratación del cemento y periodo del curado húmedo (Kosmatka, 2004). También es bien sabido que el uso de materiales cementantes suplementarios, tales como escoria de alto horno, cenizas volantes y humo de sílice, mejora la estructura de los poros y reduce la permeabilidad del concreto endurecido (Shi, 2004). En esta investigación, las mezclas de grout fueron realizadas con cemento Portland ordinario (CPO) sin adición de cementantes suplementarios, y una relación a/c de 0.40. Basados en esos datos, se buscó en la literatura ensayos de PRCI de mezclas con estas mismas características, y se encontró que el concreto tiene una permeabilidad al cloruro de 5,000 Coulombs (Ayub et al., 2013; Justice et al., 2005), y los morteros una permeabilidad a los cloruros de 4,125 Coulombs (Hosseini et al., 2018). Así que el resultado de permeabilidad a los cloruros del grout de control está dentro del rango esperado.

La adición de fibras de basalto en un rango de 0.03% a 0.10% respecto al volumen, resultó en una disminución proporcional de la penetrabilidad del ion cloruro. Las adiciones de 0.03% y 0.07% de fibra de basalto aún mantuvieron la permeabilidad en el rango alto especificado por las normas (Ver **Fig. 22**), mientras que la adición 0.10% de fibra fue la única en bajar la permeabilidad al rango moderado. Como se puede observar en la **Tabla 16**, la efectividad de la adición de fibra de basalto al 0.10% respecto al volumen de grout, en disminuir la permeabilidad con respecto a la mezcla de referencia fue de 10.82%, un valor cercano al reportado por Algin y Ozen (Algin & Ozen, 2018) en la adición al 0.10% de fibras de basalto en concretos autocompactables (CAC), que como se mencionó anteriormente tuvo una efectividad del 13.0%.

De manera consistente a los resultados de la prueba de resistividad y pulso ultrasónico, la mezcla de grout comercial GC-1 muestra una alta penetrabilidad de iones cloruro al ser la mezcla con mayor carga pasada, su permeabilidad fue tan alta que antes de las 6 horas que dura el ensayo, sobrepasó la carga permisible por el aparato y el ensayo sólo duró aproximadamente 3 horas. El grout comercial GC-2 muestra una permeabilidad similar a la del grout de laboratorio sin fibra, pero la adición de fibra de basalto permite que la permeabilidad sea aún menor que este grout comercial.

Tabla 16. Permeabilidad rápida a iones cloruro en grouts

Mezcla	Vf (%)	Carga pasada en Coulombs	SE (%)	Penetrabilidad de iones cloruro
Control	0.00	4,433.08	-	Alta
FB-1	0.03	4,377.05	-1.26%	Alta
FB-2	0.07	4,182.70	-5.65%	Alta
FB-3	0.10	3,953.46	-10.82%	Moderada
GC-1	--	9,277.00	109.27%	-
GC-2	--	4,458.50	0.57%	Alta

Notas: SE (%) = [(permeabilidad del grout – permeabilidad grout de control) / permeabilidad grout de control] 100%

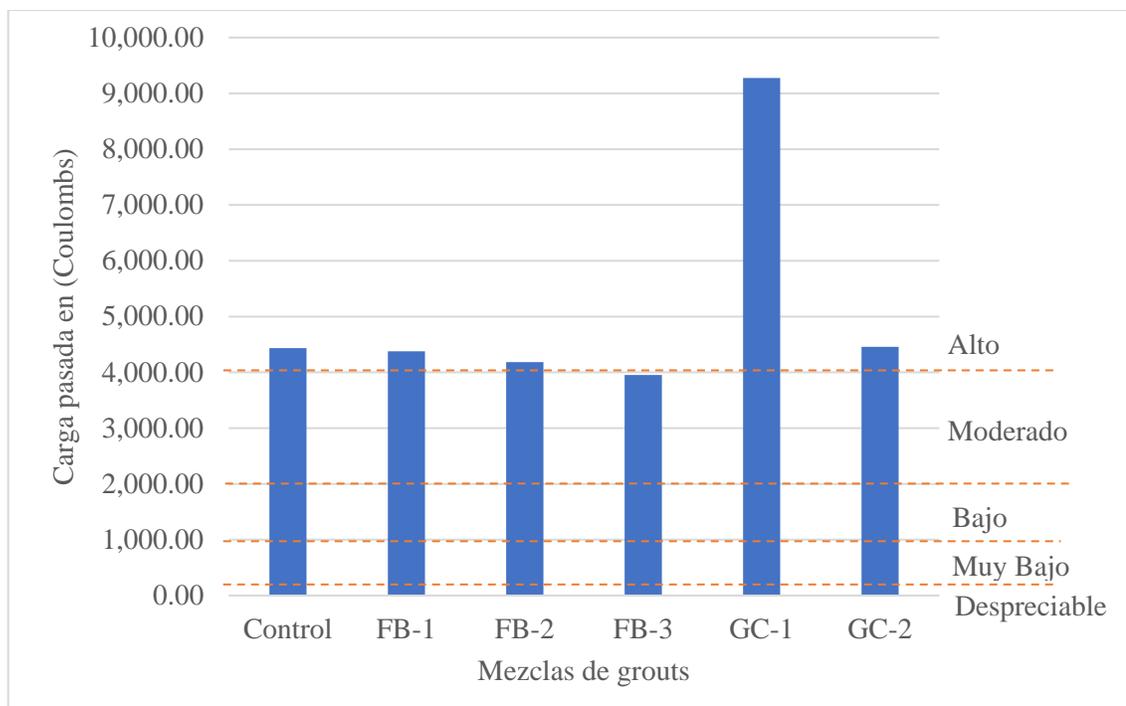


Fig. 22. Permeabilidad rápida a los iones cloruro en grouts

4.3.3 Velocidad de pulso ultrasónico

En la **Fig. 23** se presentan los resultados del ensayo de pulso ultrasónico, en el cual se monitoreó a diferentes edades. Se puede observar que al igual que el ensayo de permeabilidad, los grouts de laboratorio tienen una mayor densificación que los comerciales y que la adición de la fibra tiene una influencia positiva en disminuir su permeabilidad al reducir los agrietamientos, esto permite que la onda de sonido viaje a una mayor velocidad al haber menos agrietamientos. El contenido óptimo de fibra parece ser 0.10% respecto al volumen ya que es el que obtiene mayores velocidades.

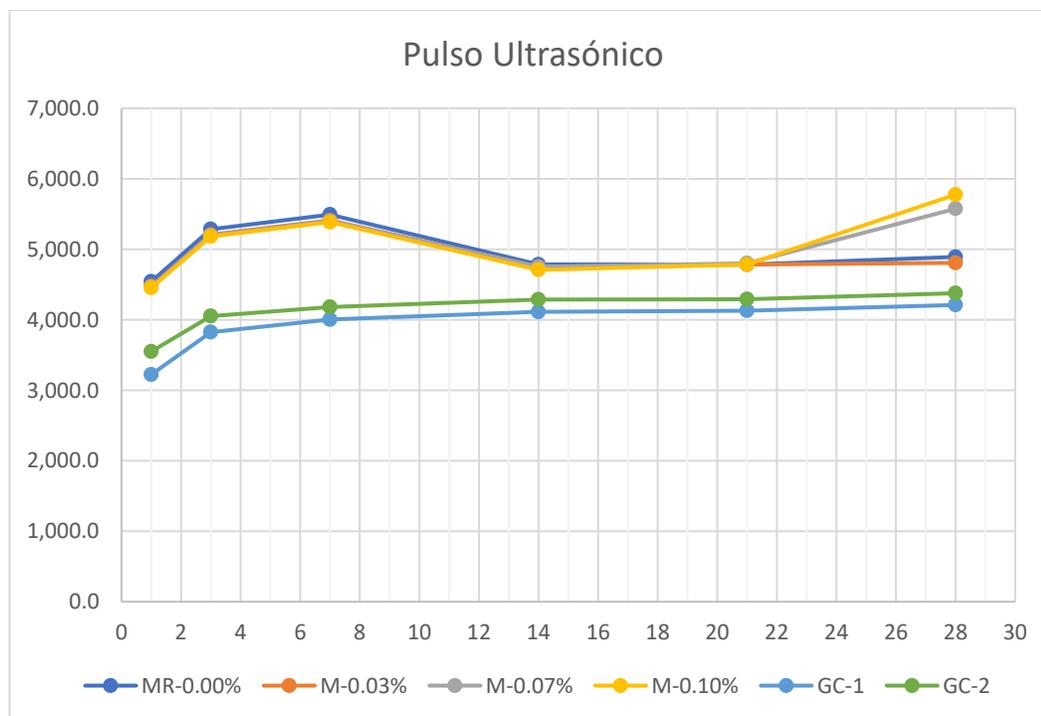


Fig. 23. Resultados de pulso ultrasónico a diferentes edades

4.3.4 Resistividad eléctrica superficial

La **Fig. 24** muestra los resultados de resistividad superficial medida en especímenes cilíndricos de las mezclas, ésta se midió hasta que los resultados dejaran de variar en más del 1%. Respecto a la mezcla de referencia sin fibra (MR-0.00%) se observa un incremento en la resistencia eléctrica superficial de las mezclas que tienen fibras en todas las edades. A edades superiores tempranas todos los grouts de laboratorio tienen mayor resistencia que los comerciales. Luego de los 7 días se observa un incremento en la resistencia del grout comercial 2 (GC-2) el cual llega a superar a los comerciales, esto debido a que el acabado de la superficie de este grout es muy liso por sus partículas pequeñas y su consistencia líquida o muy fluida en estado fresco que permite tener pocas irregularidades

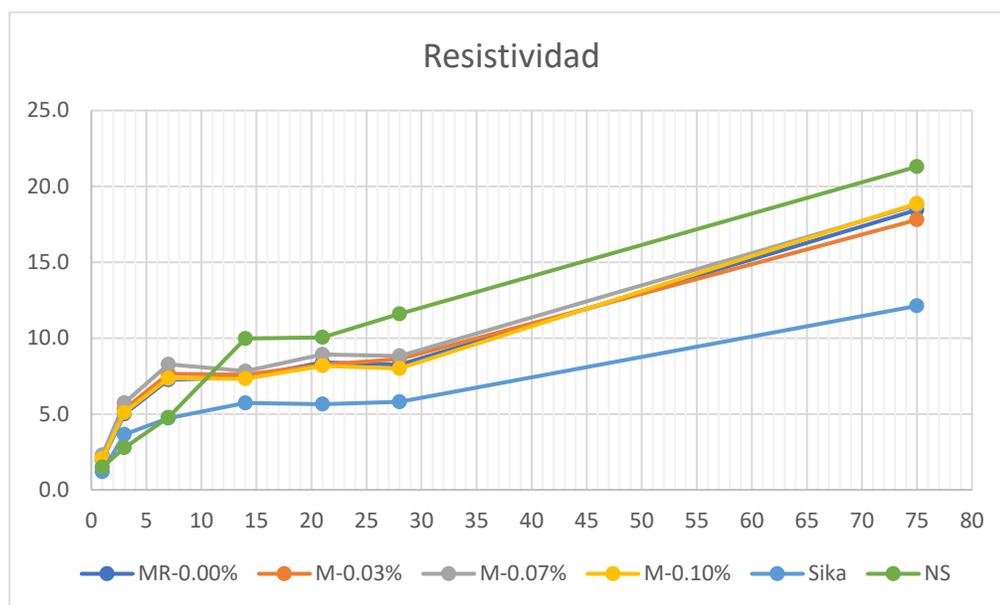


Fig. 24. Resistencia eléctrica Superficial

5 Conclusiones

- La fluidez del grout reforzado con fibra de basalto se ve directamente afectado por el contenido incorporado, y la cantidad máxima de fibra encontrada con las proporciones de mezcla propuestas es 0.10% respecto al volumen. relativamente consistente alrededor del nivel deseado controlado por la cantidad de superplastificantes usados. Se encontró que la cantidad máxima de aditivo superfluidificante es de 0.61% respecto al peso de cemento, a cantidades mayores el grout presenta segregación. Es una cantidad de aditivo inferior a la máxima recomendada por el fabricante, esto podría deberse por la compatibilidad con el aditivo reductor de la contracción que reduce la tensión superficial del agua.
- Las contracciones de las mezclas con FB son menores en comparación de la mezcla de referencia en diferentes edades, especialmente a edades tempranas. La mezcla con mejor efectividad para disminuir las contracciones por secado fue la mezcla con 0.10% de fibra respecto al volumen, a la edad de 7 días y 14 días fue menor que la del grout de mezcla de referencia en un 19.87% y 15.98%, respectivamente. También se encontró que entre mayor es el contenido de fibra en la mezcla, menor es la contracción por secado exhibida por la mezcla. Con el aumento de las edades de curado, se disminuyó el efecto de la BF sobre los comportamientos de contracción de la mezcla. A los 28 días, la influencia de la BF al 0.10% respecto al volumen de grout, bajó a 11.36% y a los 63 días bajó a 9.93%.
- Las bajas contracciones a edades tempranas indican que las fibras de basalto previenen los microagrietamientos desde etapa plástica de la mezcla, mitigando la

propagación de microgrietas durante el fraguado para que no se conviertan en grietas de contracción plástica reales al proporcionar fuerzas de puenteo a través de las grietas y evitar su propagación. Las fibras también dispersan las grietas de modo que aparecen muchas microgrietas en lugar de unas pocas más grandes al mejorar la capacidad de deformación de la mezcla en estado fresco, lo que resulta en una menor permeabilidad al haber menos conexión en las redes de poros.

- En comparación con las muestras de control, los grouts con FB aumenta ligeramente la resistencia a la compresión a una edad temprana pero luego disminuye en las edades avanzadas. Se explicó en investigaciones previas que la razón puede ser que el envejecimiento de la interfaz entre las fibras y la matriz de grout conduce a una caída en la capacidad de unión del sustrato.
- El uso de fibra de basalto reduce la permeabilidad al cloruro del grout y varía en el rango de 3,953 y 4,433 Coulombs. Las microgrietas en el grout y la porosidad interconectada en la pasta de cemento afectan la permeabilidad del grout. La utilización de fibras en los grouts reduce los canales de poros conectados en la pasta de cemento y el paso de agua de sangrado interno de la mezcla. En consecuencia, la fibra reduce la porosidad interconectada y promueve la mejora de la permeabilidad del grout.
- El rendimiento de los grouts de laboratorio es superior que los grouts comerciales, especialmente en las pruebas de permeabilidad.
- El resultado óptimo que tiene el valor de deseabilidad más alto se puede obtener para la mezcla que contiene un porcentaje de fibra de 0.10%.

6 Recomendaciones

- Ampliar las pruebas en estado fresco de los grouts, para evaluar el sangrado de las mezclas y su capacidad de llenado de ductos de presfuerzo, o su capacidad de bombeo. Y también someter las muestras a diferentes condiciones de curado, por ejemplo simular la situación de curado sellado que ocurre dentro de un ducto real de concreto postensado.
- Recomiendo hacer pruebas con humo de sílice y nanopartículas, ya que se encontró en la bibliografía que densifican la matriz y reducen la permeabilidad a iones cloruros. De utilizarlas en conjunto con fibras de basalto se podrían potenciar estos beneficios.
- Se controló el contenido cemento CPO para no obtener contracciones muy altas, pero si se utilizan cementantes suplementarios que disminuyan el calor de hidratación y cambios de volumen, y disminuir aún más las retracciones por secado.
- En esta investigación se encontró una tendencia proporcional, a mayor cantidad de fibra, mayores beneficios, pero no se detectó hasta que cantidad de fibra es el límite donde esta tendencia decae. Y no se pudo agregar porcentajes mayores a 0.10% de fibra porque la fluidez fue una limitante, y como se mencionó la fibra resta fluidez. Recomiendo adiciones como cenizas volantes, que se ha reportado aumentan la fluidez, y de esa manera se podrían permitir evaluar porcentajes mayores fibras de basalto.

- Recomiendo hacer pruebas en grouts con el uso de refuerzo híbrido de fibras de basalto y polipropileno, ya que se encontró en la literatura que pueden disminuir la permeabilidad a los cloruros del concreto hasta un 33.33% (Niu et al., 2019) y un 13% en concretos con únicamente basalto fue de 13%, es una diferencia considerable. Las fibras de basalto en esta investigación en grouts por si solas redujeron la permeabilidad al cloruro un 10.82%, y sería una buena posibilidad evaluar si en los grouts este beneficio de fibras híbridas se puede replicar.

Bibliografía

- AASHTO T 277-86. (1990). *Rapid determination of the chloride permeability of concrete* (Standard Specifications -Part II Tests). American Association of States Highway and Transportation Officials.
- ACI 222.2R-01. (2001). *Corrosion of Prestressing Steels*. American Concrete Institute.
- ACI 318S-14. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. American Concrete Institute.
- ACI 351.1R-99. (1999). *Grouting between Foundations and Bases for Support of Equipment and Machinery (Reapproved 2008)*. American Concrete Institute.
- Algin, Z., & Ozen, M. (2018). The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 678-685.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.089>
- Allen, A. H. (1978). *An introduction to prestressed concrete*. Cement and concrete Association.
- ASTM C150/C150M – 15. (2015). *Specification for Portland Cement*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-15
- ASTM C188 – 09. (2009). *Test Method for Density of Hydraulic Cement*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0188-09>
- ASTM C1107/C1107M – 08. (2008). *Specification for Packaged Dry, Hydraulic-Cement Grout (Nonshrink)*. ASTM International.
https://doi.org/10.1520/C1107_C1107M-08

- ASTM C1202 – 10. (2010). *Test Method for Electrical Indication of Concretes Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/C1202-10>
- Ayub, T., Shafiq, N., Khan, S. U., & Nuruddin, M. F. (2013). *Durability of Concrete with Different Mineral Admixtures: A Review*. 7(8), 13.
- Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M., & Fischer, G. (2020). Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, 230, 116769.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116769>
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. (2013). *Corrosion of steel in concrete* (Vol. 392). Wiley Online Library.
- Branson, D. E. (1976). *Deformation of concrete structures*. McGraw-Hill Companies.
- Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., & Taylor, C. (2016). Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 74, 182-190.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.004>
- Carsana, M., & Bertolini, L. (2016). Characterization of Segregated Grout Promoting Corrosion of Posttensioning Tendons. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001451](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001451)
- Choi, Yun-Wang, Oh, Sung-Rok, Park, Man-Seok, & Choi, Byung-Keol. (2014). The Experimental Study on the Fluidity Properties of Mortar Using Basalt Fiber and High Volume Fly Ash. *Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2(4), 345-353. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2014.2.4.345>
- Darwin, D., Dolan, C. W., & Nilson, A. H. (2016). *Design of concrete structures* (15.^a ed.). McGraw-Hill Education.

- Dias, D. P., & Thaumaturgo, C. (2005). Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044>
- Garg, S., & Misra, S. (2020). Efficiency of NDT techniques to detect voids in grouted post-tensioned concrete ducts. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 0(0), 1-22. <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1758100>
- Hosseini, P., Abolhasani, M., Mirzaei, F., Kouhi Anbaran, M. R., Khaksari, Y., & Famili, H. (2018). Influence of Two Types of Nanosilica Hydrosols on Short-Term Properties of Sustainable White Portland Cement Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2), 04017289. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002152](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002152)
- Huang, W.-H. (2001). Improving the properties of cement–fly ash grout using fiber and superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 31(7), 1033-1041. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00527-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00527-0)
- Jiang, C., Fan, K., Wu, F., & Chen, D. (2014). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, 58, 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.056>
- Jiang, C., Huang, S., Zhu, Y., Lin, Y., & Chen, D. (2016). Effect of Polypropylene and Basalt Fiber on the Behavior of Mortars for Repair Applications. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, e5927609. <https://doi.org/10.1155/2016/5927609>
- Jiang, C., McCarthy, T. J., Chen, D., & Dong, Q. Q. (2010). Influence of Basalt Fiber on Performance of Cement Mortar. *Key Engineering Materials*, 426-427, 93-96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.426-427.93>

- Justice, J. M., Kennison, L. H., Mohr, B. J., Beckwith, S. L., McCormick, L. E., Wiggins, B., Zhang, Z. Z., & Kurtis, K. E. (2005). *Comparison of Two Metakaolins and a Silica Fume Used as Supplementary Cementitious Materials*. 89.
- Khachaturian, N., & Gurfinkel, G. (1969). *Prestressed concrete*. McGraw-Hill.
- Kondraivendhan, B., & Bhattacharjee, B. (2010). Effect of age and water-cement ratio on size and dispersion of pores in ordinary portland cement paste. *ACI Materials Journal*, 107(2), 147.
- Kosmatka, S. H. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association.
- Lee, J. J., Song, J., & Kim, H. (2014). Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution. *Fibers and Polymers*, 15(11), 2329-2334. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-2329-7>
- Lin, T. Y. (1963). *Design of prestressed concrete structures* (2.^a ed.). John Wiley & Sons.
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2018). *Design of reinforced concrete* (10.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Minh, H., Mutsuyoshi, H., Taniguchi, H., & Niitani, K. (2008). Chloride-Induced Corrosion in Insufficiently Grouted Posttensioned Concrete Beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(1), 85-91. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:1(85))
- Nawy, E. G. (2010). *Prestressed concrete: A fundamental approach* (5th ed. update). Prentice Hall.
- Newlands, M. D., Paine, K. A., Vemuri, N. A., & Dhir, R. K. (2008). A linear test method for determining early-age shrinkage of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 60(10), 747-757.

- Niu, D., Huang, D., & Fu, Q. (2019). Experimental investigation on compressive strength and chloride permeability of fiber-reinforced concrete with basalt-polypropylene fibers. *Advances in Structural Engineering*, 22(10), 2278-2288. <https://doi.org/10.1177/1369433219837387>
- NMX-C414-ONNCEE-2004. (2009). *Industria de la Construcción—Cementos Hidráulicos—Especificaciones y Métodos de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- PTI Committee on Grouting Specifications. (2001). *Guide Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures*. Post-Tensioning Institute.
- PTI Committee on Grouting Specifications. (2013). *PTI M55.1-12 Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures Addendum #1*. Post-Tensioning Institute.
- PTI Committee PTT. (2013). *Post-Tensioning Terminology (PTT)*. Post-Tensioning Institute.
- Rabinovich, F. N., Zueva, V. N., & Makeeva, L. V. (2001). Stability of Basalt Fibers in a Medium of Hydrating Cement. *Glass and Ceramics*, 58(11), 431-434. <https://doi.org/10.1023/A:1014930930475>
- Ralegaonkar, R., Gavali, H., Aswath, P., & Abolmaali, S. (2018). Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review. *Construction and Building Materials*, 164, 589-602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.245>
- Randell, A., Aguirre, M., & Hamilton, H. (2015). *Effects of low reactivity fillers on the performance of post-tensioning grout*.
- Rybin, V. A., Utkin, A. V., & Baklanova, N. I. (2013). Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers. *Cement and Concrete Research*, 53, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.002>

- Shi, C. (2004). Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.007>
- Sun, X., Gao, Z., Cao, P., & Zhou, C. (2019). Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 202, 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018>
- Szilard, R. (1969). Corrosion and Corrosion Protection of Tendons in Prestressed Concrete Bridges. *ACI-Journal Proceedings*, 66(1), 42-59. <https://doi.org/10.14359/7341>
- Treadaway, K. W. J. (1971). Corrosion of Prestressed Steel Wire in Concrete. *British Corrosion Journal*, 6(2), 66-72. <https://doi.org/10.1179/000705971798324044>
- Vu, N. A., Castel, A., & François, R. (2009). Effect of stress corrosion cracking on stress-strain response of steel wires used in prestressed concrete beams. *Corrosion Science*, 51(6), 1453-1459. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.033>
- Wang, L., Hu, Z., Yi, J., Dai, L., Ma, Y., & Zhang, X. (2020). Shear Behavior of Corroded Post-Tensioned Prestressed Concrete Beams with Full/Insufficient Grouting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(6), 1881-1892. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1777-4>
- Wang, L., Zhang, X., Zhang, J., Ma, Y., Xiang, Y., & Liu, Y. (2014). Effect of insufficient grouting and strand corrosion on flexural behavior of PC beams. *Construction and Building Materials*, 53, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.069>

- Wei, B., Cao, H., & Song, S. (2010). Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials & Design*, 31(9), 4244-4250. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.009>
- Yoo, D.-Y., Ryu, G.-S., Yuan, T., Koh, K.-T., & Yoon, Y.-S. (2015). Cracking Behavior of Posttensioning Grout with Various Strand-to-Duct Area Ratios. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014197. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001152](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001152)
- Zhao, R., Weng, Y., Tuan, C. Y., & Xu, A. (2019). The Influence of Water/Cement Ratio and Air Entrainment on the Electric Resistivity of Ionically Conductive Mortar. *Materials*, 12(7), 1125. <https://doi.org/10.3390/ma12071125>