

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CURADO INTERNO MEJORADO EN  
LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE  
GROUTS DE TENDONES DE PREESFUERZO**

**POR**

**JOSÉ DAVID BETANCOURTH MENDOZA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES  
DE CONSTRUCCIÓN**

**MAYO, 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS  
EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CURADO INTERNO MEJORADO EN LAS  
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE GROUTS DE  
TENDONES DE PREESFUERZO**

**POR  
JOSÉ DAVID BETANCOURTH MENDOZA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES  
DE CONSTRUCCIÓN**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL**

**CO-DIRECTOR DE TESIS  
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**

**ASESOR EXTERNO  
PROF. DALE PATRICK BENTZ (NIST)**

## **Agradecimientos**

A mis padres Elizabeth Mendoza y Modesto Betancourth, porque por ellos soy lo que ahora soy; con su apoyo incondicional y aún en la distancia me dieron las fuerzas para cumplir esta meta.

A mis hermanos Elita y Modesto, por siempre estar pendientes y guiándome como su hermano menor.

A mis maestros de la FIC y de la UANL en general que recibieron a este extranjero con ansias de aprender de ellos, y me brindaron sus conocimientos para enriquecer esta experiencia académica. En especial a mi asesor el Dr. José Manuel Mendoza, quien ha sido como un padre y me ha orientado en todo el camino de este proyecto.

A mis compañeros de la maestría y de los cubículos, Jennifer, Loth, Mike, Diego, David, Roberto, René, Hugo, Paco, Ulises, Victor, Sergio, Luis y Julio por recibirme como uno de los suyos y ser cómplices de cada experiencia vivida en México.

A los compañeros de tecnología del concreto, Anguiano, Daniel y en especial a Guillermo por enseñarme siempre que las cosas se pueden hacer mejor.

A la futura ingeniero civil Diana Carolina Aguilar, quien fue una ayuda importante y oportuna en la experimentación de este proyecto, como parte de sus labores en su servicio social.

A mi asesor externo Dale Bentz y a todo el personal del NIST por recibirme en mi estancia de investigación y por enseñarme que la sabiduría y la humildad van ligadas, y las encontramos en toda clase de personas.

Al Dr. Pedro Montes por colaborar conmigo como revisor de tesis, sus palabras y comentarios enriquecieron mucho esta investigación.

Por último, y de manera muy especial a la Secretaría de Relaciones Exteriores de México, que con su programa de becas de excelencia para extranjeros, significan una oportunidad única para que extranjeros como yo podamos aprender y desarrollarnos como profesionales competentes para enfrentar las solicitudes actuales del ámbito laboral y académico.

¡A todos muchas gracias!

## **Dedicatoria**

A mi patria Honduras, que me vio nacer, y me dio la oportunidad de desarrollarme como estudiante y profesional con las aptitudes para obtener una beca en el extranjero, a sus hijos, que aunque muchos desde lejos la vemos sufrir, en nuestros corazones existe la esperanza de que su porvenir sea próspero, y que su dirección la tomen las personas que quieran solo el bien de todos.

A ustedes hondureños que día a día luchan por ser mejores y por obtener mejores oportunidades para hacer de nuestro país algo grande y mejor.

## Tabla de contenido

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Introducción .....	1
1.2    Planteamiento del Problema .....	2
1.3    Antecedentes .....	3
1.3.1    Los grouts y las estructuras de Concreto Preesforzado .....	3
1.3.2    Efecto de los modificadores de la viscosidad en la difusión de iones (VERDiCT) .....	14
1.3.3    Curado interno en concretos y morteros.....	22
1.4    Justificación .....	27
1.5    Hipótesis .....	29
1.6    Objetivos .....	29
1.6.1    Objetivo General .....	29
1.6.2    Objetivos Específicos .....	29
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	30
2.1    Concreto preesforzado .....	30
2.1.1    Historia.....	30
2.1.2    Ventajas y desventajas del concreto preesforzado .....	31
2.1.3    Grouts para concreto preesforzado.....	32
2.1.4    Proporcionamiento de mezcla de los grouts .....	33
2.1.5    Corrosión del acero de preesfuerzo. ....	34
2.1.5.1    Carbonatación del concreto .....	35
2.1.5.2    Corrosión por cloruros. ....	35
2.1.5.3    Corrosión por picadura .....	36
2.1.5.4    Corrosión bajo tensión.....	36
2.2    Contracciones del concreto .....	36
2.2.1    Contracción química.....	37

2.2.2 Contracción autógena .....	37
2.2.3 Contracción por temperatura.....	37
2.2.4 Contracción por secado .....	37
2.3 Curado interno .....	38
2.3.1 Métodos de curado interno.....	39
2.3.1.1 Uso de agregados de peso ligero en sustitución de agregado normal ....	39
2.3.2 Efectos del curado interno en las propiedades del concreto .....	40
2.3.2.1 Efecto en la resistencia a la compresión .....	40
2.3.2.2 Efecto en la porosidad .....	40
2.3.2.3 Efecto en la contracción autógena.....	40
CAPÍTULO III METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	41
3.1 Materiales .....	41
3.1.1 Cemento.....	41
3.1.2 Agregado fino .....	41
3.1.3 Agregado ligero .....	42
3.1.4 Aditivo superfluidificante.....	43
3.1.5 Aditivo reductor de la contracción .....	43
3.1.6 Grouts en polvo comerciales.....	43
3.1.7 Acero.....	43
3.2 Mezclas de grouts comerciales y de laboratorio .....	44
3.2.1 Mezcla de referencia (M1/REF) .....	44
3.2.2 Mezcla con curado interno mejorado (M2/CIV) .....	44
3.2.3 Mezcla de grout comercial (M3/BAS) .....	45
3.2.4 Mezcla de grout comercial (M4/FES) .....	45
3.2.4.1 Preparación y mezclado .....	46
3.3 Métodos y Ensayos .....	46

3.3.1 Ensayos y técnicas de caracterización.....	46
3.3.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX).....	46
3.3.1.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	47
3.3.1.3 Difracción de rayos X (DRX).....	47
3.3.1.4 Distribución de tamaño de partículas.....	47
3.3.1.6 Densidad y absorción .....	47
3.3.2 Ensayos y pruebas físicas y mecánicas.....	48
3.3.2.1 Pruebas en estado fresco .....	48
3.3.2.1.1 Masa unitaria y contenido de aire .....	48
3.3.2.1.2 Fluidez.....	49
3.3.2.1.3 Tiempo de fraguado .....	50
3.3.2.1.4 Calorimetría isotérmica .....	50
3.3.2.2 Pruebas en estado endurecido .....	52
3.3.2.2.1 Resistencia a compresión .....	52
3.3.2.2.2 Esfuerzo de adherencia .....	54
3.3.2.2.3 Contracción autógena .....	55
3.3.2.3 Pruebas de durabilidad.....	56
3.3.2.3.1 Medición de potencial y velocidad de corrosión .....	56
3.3.2.3.2 Medición de resistividad eléctrica superficial.....	58
3.3.2.3.2 Permeabilidad rápida a los iones cloruro. ....	58
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1 Ensayos y técnicas de caracterización inicial .....	60
4.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX) .....	60
4.1.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB) .....	61
4.1.3 Difracción de rayos X (DRX) .....	64
4.1.4 Distribución de tamaño de partículas .....	66

4.2 Ensayos y pruebas físicas y mecánicas .....	67
4.2.1 Pruebas en estado fresco .....	67
4.2.1.1 Masa unitaria y contenido de aire .....	67
4.2.1.2 Fluidez .....	68
4.2.1.3 Tiempo de fraguado.....	68
4.2.1.4 Calorimetría isotérmica.....	70
4.2.2 Pruebas en estado endurecido .....	73
4.2.2.1 Resistencia a compresión.....	73
4.2.2.1.1 Resistencia a compresión en curado sumergido.....	73
4.2.2.1.2 Resistencia a compresión en curado sellado .....	74
4.2.2.1.3 Resistencia a compresión en curado en solución salina.....	75
4.2.2.2 Esfuerzo de adherencia.....	76
4.2.2.3 Contracción Autógena .....	77
4.2.3 Pruebas de durabilidad .....	78
4.2.3.1 Medición de potencial y velocidad de corrosión.....	78
4.2.3.2 Medición de resistividad eléctrica superficial .....	82
4.2.3.3 Permeabilidad rápida a los iones cloruro .....	84
4.2.4 Pruebas de caracterización complementaria .....	86
4.2.4.1 Microscopía electrónica de barrido .....	86
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES .....	91
BIBLIOGRAFÍA .....	93



## Índice de figuras

Figura 1 Dimensiones del Espécimen .....	7
Figura 2 Esquema del sistema de corrosión acelerada.....	7
Figura 3 Forma de las cavidades (cavity) en las vigas y de la manera de corte (saw) de los cables. ....	9
Figura 4 Arreglo de carga y ensaye de las vigas, mostrando las cavidades (cavity) y donde se ubicaron extensómetros (strain gauges) para la medición de las deflexiones.....	9
Figura 5 Condiciones de grouteo de las vigas B1-B3.....	11
Figura 6 Condiciones de grouteo B4, B5 y PCB.....	12
Figura 7 Configuración de armado y dimensiones de las vigas .....	13
Figura 8 Configuración del sistema de corrosión acelerado.....	13
Figura 9 Configuración del arreglo para la corrosión acelerada.....	14
Figura 10 Cilindros curados por 7 días y luego expuestos por 28 días a la solución de cloruro, el color café indica el área con menor concentración de cloruros. (a) Mezcla sin VERDiCT, (b) Mezcla con VERDiCT en el agua de mezcla y (c) Mezcla con VERDiCT agregado por el método FLAIR. ....	17
Figura 11 Penetración de Cloruros en Morteros curados por 7 días, Surface indica el curado en una solución de hidróxidos con y sin el aditivo VERDiCT, y FLAIR indica el curado en condiciones selladas. ....	18
Figura 12 Penetración de Cloruros en Morteros curados por 28 días, Surface indica el curado en una solución de hidróxidos con y sin el aditivo VERDiCT, y FLAIR indica el curado en condiciones selladas. ....	18
Figura 13 Imágenes de los cilindros de mortero (el primero de control, el segundo con el MV en el agua de mezclado, y el tercero con el MV vía FLAIR) el color gris indica la profundidad de penetración de los iones cloruro en los especímenes. ....	20
Figura 14 Tipos de corrosión ocurridas en el acero embebido en el concreto .....	35
Figura 15 Llenado del recipiente de volumen y peso conocido para la determinación de la masa unitaria de la mezcla. ....	48
Figura 16 Extensibilidad de las mezclas (ASTM C230).....	49
Figura 17 Fluidez de la mezcla M4 (ASTM C939).....	49
Figura 18 Medición del tiempo de fraguado por medio de un aparato automático y las penetraciones realizadas por el mismo. ....	50

Figura 19 Diagrama de la configuración de la prueba y equipo utilizado para la medición de capacidad calorífica.....	51
Figura 20 Muestra de 11.5 g de cemento de referencia .....	51
Figura 21 Colocación de las muestras en las cápsulas y sellado de las mismas.....	52
Figura 22 Calorímetro utilizado .....	52
Figura 23 Elaboración y diagrama de cubos para resistencia a compresión .....	53
Figura 24 Ensaye a compresión de cubos .....	53
Figura 25 Diagrama de los especímenes con torón embebido para el ensaye de adherencia.....	54
Figura 26 Elaboración, curado y ensaye de los especímenes de adherencia.....	55
Figura 27 Tubos corrugados para medición de contracción autógena.....	55
Figura 28 Extensómetro utilizado para la medición de los tubos corrugados.....	55
Figura 29 Esquema y dimensiones de los prismas utilizados para la medición de $E_{corr}$ e $I_{corr}$ del acero embebido en los grouts .....	56
Figura 30 Equipo y arreglo utilizado para la medición de $E_{corr}$ e $I_{corr}$ .....	57
Figura 31 Diagrama de los cilindros y marcado de los mismos para su medición. ....	58
Figura 32 Equipo utilizado para la medición de la resistividad .....	58
Figura 33 Preparación de los especímenes para la prueba de permeabilidad rápida a los iones cloruro.....	59
Figura 34 Arreglo de las celdas para el ensayo de permeabilidad rápida a los iones cloruro. ....	59
Figura 35 Micrografía de la morfología de los granos del cemento CPO-40.....	61
Figura 36 Morfología encontrada en el grout comercial BAS .....	62
Figura 37 Morfología de los granos de cemento y agregados del grout comercial FES	62
Figura 38 Análisis químico elemental realizado por medio de EDS a la partícula esférica del grout BAS .....	63
Figura 39 Micrografía y EDS del agregado del grout BAS .....	63
Figura 40 Micrografía y EDS del agregado del grout FES .....	64
Figura 41 Difractograma del cemento CPO-40 .....	64
Figura 42 Difractograma del grout comercial BAS .....	65
Figura 43 Difractograma del grout comercial FES.....	66
Figura 44 Distribución de tamaño de partículas del cemento y los grouts comerciales .	66
Figura 45 Flujo de calor en 24 horas de hidratación de los grouts .....	71

Figura 46 Calor liberado durante 7 días de hidratación de los grouts .....	72
Figura 47 Resultados de resistencia a compresión de los especímenes en curado sumergido.....	73
Figura 48 Resultados de resistencia a compresión de los especímenes en curado sellado .....	74
Figura 49 Resistencia a compresión vs Calor liberado a 7 días en curado sellado.....	75
Figura 50 Resultados de resistencia a compresión de los especímenes en curado en solución salina.....	76
Figura 51 Resultados de resistencia a compresión y de esfuerzo de adherencia a los 28 días .....	77
Figura 52 Espécimen de contracción autógena de la mezcla M3/BAS con la mitad de sección vacía.....	78
Figura 53 Potenciales de corrosión medidos a 321 días de exposición .....	79
Figura 54 Velocidades de corrosión medidas a 321 días de exposición .....	80
Figura 55 Velocidad de corrosión acumulada durante 321 días de exposición.....	81
Figura 56 Resistividad eléctrica superficial medida a 140 días .....	83
Figura 57 Conductividad eléctrica vs Carga pasada .....	85
Figura 58 Micrografías a 100x de la mezcla M1/REF a 28 días en curado sumergido (izq.) y en curado sellado (der.).....	86
Figura 59 Agrietamientos observados en la pasta de la mezcla M1/REF en curado sellado. ....	86
Figura 60 Micrografías a 100x de la mezcla M2/CIV a 28 días en curado sumergido (izq.) y en curado sellado (der.).....	87
Figura 61 Interfaz agregado ligero-pasta de cemento en mezcla M2/CIV a 28 días de curado sellado.....	87
Figura 62 Micrografías a 500x de la mezcla M3/BAS a 28 días en curado sumergido (izq.) y en curado sellado (der.).....	88
Figura 63 Micrografías a 100x de la mezcla M4/FES a 28 días en curado sumergido (izq.) y en curado sellado (der.).....	88

## Índice de tablas

Tabla 1 Nombres químicos y masas moleculares de los MV empleados en el estudio .	15
Tabla 2 Composición de óxidos del cemento .....	41
Tabla 3 Granulometría del agregado fino .....	42
Tabla 4 Granulometría del agregado ligero .....	42
Tabla 5 Propiedades mecánicas del acero (ASTM A416) .....	43
Tabla 6 Análisis Químico del acero .....	44
Tabla 7 Proporcionamiento de la mezcla de referencia (M1/REF) .....	44
Tabla 8 Proporcionamiento de la mezcla con curado interno mejorado (M2/CIV).....	45
Tabla 9 Proporcionamiento de mezcla de grout comercial (M3/BAS) .....	45
Tabla 10 Proporcionamiento de mezcla de grout comercial (M4/FES) .....	45
Tabla 11 Criterios para evaluar $E_{corr}$ en el acero embebido en concreto.....	57
Tabla 12 Nivel de corrosión según $I_{corr}$ .....	57
Tabla 13 Composición de óxidos del cemento y los grouts comerciales.....	60
Tabla 14 Masa unitaria y contenido de aire de las diferentes mezclas .....	67
Tabla 15 Extensibilidad y Fluidez de los grouts.....	68
Tabla 16 Tiempos de fraguado inicial y final de los grouts .....	69
Tabla 17 Resultados de resistencia a compresión en curado sellado y calor liberado a 7 días .....	75
Tabla 18 Resultados de esfuerzo de adherencia y resistencia a compresión en curado sumergido a 28 días .....	76
Tabla 19 Porcentajes de pérdida de masa obtenidos en los especímenes de acero embebidos en las mezclas. ....	80
Tabla 20 Resultados de la resistencia a la penetración de iones cloruro de las mezclas .....	84
Tabla 21 Resultados de conductividad eléctrica y carga pasada de las mezclas .....	85

# CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

En la actualidad, el deterioro de las estructuras de concreto reforzado es evidente y recurrente alrededor del mundo, este fenómeno se ve intensificado por las atmósferas agresivas en las que se encuentran estas estructuras, fenómenos como la carbonatación del concreto, y la corrosión del acero de refuerzo son los más influyentes en el deterioro. En las estructuras de concreto reforzado, se encuentra una categoría diferente, la de las estructuras de concreto preesforzado, por su uso estratégico en obras de importancia como puentes carreteros, ferroviarios y otros [1]. 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 preesfuerzo; la corrosión por tensión, ocurrida en estructuras de concreto preesforzado 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 [2]. Algunas medidas tomadas para la protección del acero de preesfuerzo consisten en la densificación de la matriz cementante de los concretos, disminuyendo su relación agua/cemento ( $a/c$ ), utilizando materiales cementantes suplementarios, con el uso de aditivos entre otros. El uso de grouts en las estructuras de concreto preesforzado, es una medida para proteger al acero de preesfuerzo de la corrosión, los grouts son mezclas de materiales cementantes y agua que pueden o no llevar agregados, y son utilizados para rellenar completamente los ductos de los tendones de preesfuerzo, para evitar la corrosión del acero. En esta investigación se utiliza la tecnología del curado interno mejorado, aplicada en los grouts para su evaluación en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los mismos. El curado interno mejorado consiste en introducir una cantidad adicional de agua de curado, para promover una mayor hidratación y densificación de la matriz cementante, además de modificar la viscosidad en la solución de poro, para disminuir la difusión de iones cloruro [3], y aumentar la durabilidad al proteger al acero de preesfuerzo de la corrosión.

## 1.2 Planteamiento del Problema

Uno de los factores influyentes en el deterioro de las estructuras de concreto preesforzado es la degradación del acero producto de la corrosión del mismo. La corrosión se puede dar por diferentes procesos, el ingreso del  $\text{CO}_2$  por los poros de la matriz cementante, promueve el fenómeno de la carbonatación del concreto, lo que disminuye el PH al interior del concreto, originando la despasivación del acero, y por consiguiente su corrosión [4]. Otro fenómeno es el de la corrosión del acero por la presencia de cloruros en la matriz cementante, que pueden generar picaduras y corrosión localizada en el acero, lo que destruye la capa pasiva del acero, y genera una pequeña zona anódica en presencia de una gran zona catódica, lo que promueve y potencia el fenómeno de corrosión [5]. Los mecanismos de transporte de los cloruros son variados, estos se pueden vincular con los mecanismos de transporte de un fluido en un medio poroso, estos mecanismos incluyen la succión capilar, difusión y permeabilidad. Esta investigación se centrará únicamente en el proceso de corrosión inducido por la difusión de cloruros en la matriz cementante. El fenómeno de la difusión se da por diferencia de concentraciones en dos zonas adyacentes en el concreto, esto genera un movimiento desde la zona más concentrada hacia la menos concentrada, en la búsqueda de un equilibrio.

Las mezclas cementicias con relaciones a/c bajas y sin curado adecuado pueden generar contracciones que visto desde el punto de la durabilidad pueden ser contraproducentes debido a los agrietamientos[6], los cuales forman vías de acceso rápido de los iones como los cloruros hacia el acero [7]. El caso de los grouts es un ejemplo de este tipo de mezclas, ya que los grouts empleados como recubrimiento de tendones de preesfuerzo necesitan tener una relación a/c máxima de 0.45 [8]. En esta investigación se utiliza una mezcla con relación a/c de 0.4, por lo cual se emplea la tecnología del curado interno mejorado (CIM) con un aditivo reductor de la contracción (ARC), para promover una mayor hidratación, disminuir los agrietamientos generados por las contracciones, y además de modificar la viscosidad de la solución del poro para disminuir la difusión de iones cloruro en los grouts. Esta tecnología del CIM se ha probado anteriormente en mezclas de concreto y mortero de alto comportamiento, y se han evaluado sus propiedades mecánicas y de durabilidad ante agentes como los cloruros, sulfatos y  $\text{CO}_2$ [9-11], obteniendo resultados favorables en la mitigación de la contracción

autógena, de lo que se infiere que disminuyen también los agrietamientos, y la función del ARC como modificador de la viscosidad, también ha sugerido beneficios en las propiedades de durabilidad como la penetración de iones cloro en estas mezclas. Por lo anterior se espera que en esta investigación la tecnología del CIM promueva beneficios en la densificación de la matriz, por la mayor hidratación, y que esto se vea reflejado en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los grouts para que éste sea utilizado como protector del acero de preesfuerzo ante la corrosión.

### **1.3 Antecedentes**

#### **1.3.1 Los grouts y las estructuras de Concreto Preesforzado**

**Hope, B.B. et al.** [12] evaluaron diferentes proporcionamientos de grouts conteniendo diferentes porcentajes de cemento, humo de sílice y ceniza volante (como puzolanas), nitrito de calcio (inhibidor de la corrosión), polvo de aluminio (agente expansivo) y aditivo superplastificante para propiedades reológicas esperadas. Estas mezclas fueron evaluadas inicialmente por sus propiedades de flujo, expansión y sangrado, viscosidad, densidad y absorción, resistencia a compresión, y PH. Eventualmente fueron evaluadas por sus propiedades de durabilidad, a través de pruebas de resistividad eléctrica, permeabilidad a los iones cloruro, susceptibilidad a la corrosión (por medio de potencial y corriente de corrosión), resistencia y expansión.

Como era de esperarse, las mezclas con mayor sustitución de humo de sílice y menor relación a/c obtuvieron mayor resistividad eléctrica (hasta 56 K $\Omega$ -cm), en las pruebas de permeabilidad a los iones cloruro, resultados similares se obtuvieron, ya que en la mezcla con mayor sustitución de humo de sílice obtuvo una carga menor que la mezcla de referencia, lo que indica una menor permeabilidad a los iones cloruro, esto a su vez se traduce en un menor riesgo de corrosión para el acero. Finalmente y en concordancia, con los demás resultados de pruebas de durabilidad, las mediciones de potenciales y corriente de corrosión, muestran que con la mayor sustitución de humo de sílice se obtienen menores diferencias de potencial y menores corrientes de corrosión, de hecho la mezcla con el 15% de humo de sílice obtuvo una corriente de corrosión 92% menor que la de control, todos estos resultados sugieren que por la presencia del humo de sílice se genera una estructura más densa, ya que el humo de sílice tiene un tamaño de partícula mucho menor que el del cemento, lo que ayuda a un mejor acomodo y a proporcionar una matriz cementante más densa.

Esta es una de las primeras investigaciones donde evalúan las propiedades de los grouts debido a su importancia como protector ante la corrosión del acero de preesfuerzo, aunque en su proporcionamiento no utilizaron agregados, utilizan otros agentes como el polvo de aluminio que genera expansiones, para contrarrestar las contracciones propias de la hidratación del cemento, y asegurar un llenado completo de los ductos de los tendones de preesfuerzo, además del uso de un inhibidor de la corrosión, si bien estos aditivos son recomendados, para fines de investigación podrían intervenir en el análisis de resultados para proponer un proporcionamiento adecuado por su durabilidad.

**Lankard, D. R. et al.** [13] expusieron la importancia de los grouts como protectores ante la corrosión del acero de preesfuerzo, y de la necesidad de mejorar sus propiedades mecánicas, y de durabilidad. Comentaron además que normalmente no se le daba importancia al proporcionamiento de mezcla de los grouts, ya que inicialmente eran mezclas sencillas de cemento y agua, y no prestaban atención a sus propiedades de durabilidad. Mencionaron también que los grouts deben cumplir con ciertas características de fluidez para asegurar el completo llenado de los ductos, suficiente tiempo antes del fraguado para su inyección en los ductos, una consistencia aceptable para evitar el sangrado y segregación, una resistencia adecuada para la transferencia de esfuerzos de los tendones a los miembros estructurales, y por último la habilidad de proteger al acero de la corrosión.

Con respecto a la resistencia adecuada para la transferencia de esfuerzos, mencionaron que con una relación a/c de 0.5 era suficiente para lograrla, pero los retos se presentaban en la mejora de las propiedades influyentes en el colocado, la estabilidad volumétrica y en la habilidad de proteger al acero de la corrosión; este último aspecto se puede lograr reduciendo la permeabilidad de los iones cloruro en la mezcla, y sugieren lograrlo reduciendo la relación a/c, utilizando humo de sílice, escoria granulada y otros aditivos poliméricos. Otro aspecto importante es el hecho de usar agentes expansivos para mantener una estabilidad volumétrica y asegurar el llenado completo de los ductos, la acción expansiva de estos agentes es preferible a la contracción generada por la hidratación del cemento que también puede conllevar agrietamientos nocivos para la durabilidad de la estructura.



**Khayat, K. H. et al.** [14] evaluaron el desempeño de grouts hechos con cemento, agua, humo de sílice, aditivos inclusores de aire, aditivos reductores de agua y modificadores de la viscosidad, estos dos últimos para obtener una mezcla con estabilidad, ya que mencionaron que debido a la importancia del grout como protector del acero de la corrosión, el mismo tenía que ser estable, refiriéndose a no presentar sangrado excesivo, una fluidez y viscosidad adecuada, para mantener los espacios vacíos en los ductos completamente llenos. Mencionaron además que al utilizar humo de sílice en reemplazo del cemento se esperaba un mayor consumo de los aditivos reductores de agua para obtener propiedades reológicas adecuadas. El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de las dosis de estos aditivos, y de la relación a/c en las propiedades reológicas y mecánicas de los grouts, y la influencia de dos temperaturas de curado (-10 y 23°C) en la ganancia potencial de resistencia a compresión de grout en concreto frío.

Como resultados observaron que a mayor dosis del aditivo reductor de agua, el tiempo de flujo disminuía y aumentaba el mini revenimiento, así como se disminuía el sangrado, esto debido a la mejora en la dispersión y en el empaquetamiento de las partículas debido al efecto dispersante del aditivo reductor de agua; para una dosis de aditivo reductor de agua, a mayor dosis del aditivo modificador de la viscosidad, la fluidez disminuía, y se concluyó que con una pequeña dosis del modificador de la viscosidad (0.03%) era suficiente para mantener una estabilidad adecuada a la pérdida de agua. Finalmente y basados en los resultados de las propiedades de fluidez sangrado y estabilidad, obtuvieron una mezcla óptima que consistía de 8% de humo de sílice, relación a/c de 0.4, 1.6% de aditivo reductor de agua. 0.03% del modificador de la viscosidad, y una dosis baja de agente expansivo diluido, para evaluar el efecto del aire incluido en las propiedades reológicas y en la ganancia de resistencia. Como era de esperarse a mayor aire incluido se obtenía una fluidez inicial mayor. Con respecto a las temperaturas de curado, en el curado frío se observó una menor ganancia de resistencia en relación al curado en temperatura normal, esto debido a que la baja temperatura modifica la cinética de hidratación del cemento, lo interesante es que a -10°C de curado, a edades de 3 y 7 días, las mezclas con mayor aire incluido obtuvieron resistencias ligeramente mayores, esto se revirtió a la edad de 28 días. En el curado a temperatura normal (23°C) en todas las edades, se obtuvieron mayores resistencias con respecto al

curado frío, y como era de esperarse a menor aire incluido mayor era la resistencia en cada edad.

Este trabajo si bien evalúa el efecto de los aditivos en las propiedades de los grouts, y estudia las dosis óptimas de los mismos, no trabajó con agregados en sus mezclas, y aunque mencionan la importancia de los grouts para la protección del acero ante la corrosión no evaluó propiedades de durabilidad para evaluar su función como protector de la corrosión del acero.

**Schokker A.J. et al.** [15] mencionaron que los grouts son a menudo la última defensa del acero de preesfuerzo ante la corrosión, y que a menudo este aspecto es pasado por alto, reportaron que debido a fallas desastrosas en puentes postensados en Europa (Reino Unido y Bélgica) se han comenzado a dar recomendaciones para el buen empleo de los grouts para proteger al acero de la corrosión. Este trabajo consistió en la evaluación de diferentes grouts en pruebas de corrosión acelerada, y una prueba en un ducto a escala real para simular las condiciones de servicio de los grouts. En este caso se centrará en los resultados únicamente de las pruebas de corrosión. Los grouts consistían de cemento portland tipo I, sustituciones de ceniza volante y humo de sílice, aditivos fluidificantes, anti sangrado y expansivos en diferentes proporciones. Para la prueba de corrosión acelerada utilizaron la polarización anódica, que provee un gradiente de potencial, conduciendo a los cloruros cargados negativamente a través del grout hacia el acero. El diagrama del espécimen evaluado y el arreglo del sistema de corrosión acelerada se muestran en las Figura 1 y Figura 2.

Los resultados mostraron que la mayoría de los grouts que contenían aditivos químicos no tuvieron un buen desempeño, en particular el pobre desempeño del grout con humo de sílice (15%), se pudo deber a la gran cantidad de aditivo fluidificante necesario para alcanzar una fluidez esperada en una mezcla con relación a/c de 0.35, además que se supone que el humo de sílice es más beneficioso en sustituciones menores (5-15%), también se supone que el humo de sílice es más aplicable en mezclas con relación a/c mayores, debido a la gran cantidad de aditivo fluidificante necesario para mantener una fluidez en relaciones a/c bajas. De los resultados es evidente que un grout que combine una baja permeabilidad y la menor cantidad de aditivos químicos obtiene

un tiempo de corrosión más largo y por lo tanto un mejor desempeño ante la corrosión del acero.

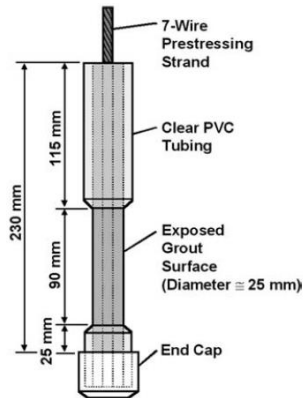


Figura 1 Dimensiones del Especimen [15]

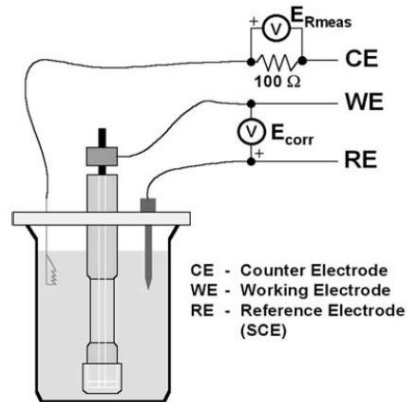


Figura 2 Esquema del sistema de corrosión acelerada [15]

De este trabajo se puede vislumbrar que la dosificación adecuada de los cementantes suplementarios, el humo de sílice en particular, es muy importante para un buen desempeño de los grouts como protectores ante la corrosión, el uso excesivo de aditivos resulta contraproducente para este desempeño, por lo que diseñar mezclas más sencillas con proporcionamientos adecuados es más recomendable.

**Minh H. et al.** [16] probaron la influencia de las condiciones de grouteo en el agrietamiento y capacidad de carga de vigas postensadas inducidas a la corrosión por cloruro. Se probaron series de 2 especímenes diferentes, la Serie A, eran vigas con una vaina y tendón de acero rectos, y en ellas se probaron diferentes razones de grouteo, una al 0%, otra al 33%, otra al 66% y otra al 100%, algunas vainas fueron llenadas con agua antes del grouteo para determinar la influencia del agua en la corrosión. Mientras que la Serie H eran vigas con una vaina y tendón curvo, y se les dieron diferentes longitudes de grouteo desde los extremos de la viga, unas a 15 cm de los extremos, otras a 47.5 cm, y las otras fueron completamente grouteadas en toda la longitud de la vaina.

Ambas series fueron colocadas en un proceso acelerado de corrosión, por medio de un tanque acrílico con una solución al 5% de NaCl, y con una malla de titanio en el fondo que funcionaría como cátodo, mientras que los tendones de acero funcionarían como ánodos, para luego aplicarles una corriente directa y acelerar el proceso de

corrosión. Concluyeron que el tendón de acero está mejor protegido si la vaina está totalmente grouteada, porque se observó una menor pérdida de peso del tendón de acero en las vigas con mayor razón de grouteo. El grouteo insuficiente de las vainas curvas lleva a un descenso considerable de la fuerza de preesfuerzo de los tendones.

De esto se puede afirmar la importancia del grout en la protección del acero de preesfuerzo contra la corrosión, además de mejorar las propiedades mecánicas, esta investigación no utilizó un grout con características particulares, de hecho no se menciona el proporcionamiento de mezcla, esto indica que el enfoque es centrado en las propiedades estructurales y no en los materiales. Lo destacable de la investigación es la metodología y el arreglo experimental para la inducción acelerada del proceso de corrosión de las vigas, este arreglo se puede utilizar para investigaciones futuras donde el objetivo sea probar diferentes grouts.

**Coronelli D. et al.** [1] realizaron vigas de concreto postensado adheridas, o sea, les inyectaron grout después de ser coladas y tensadas. El objetivo de la investigación era evaluar la influencia del fenómeno de la corrosión bajo tensión en la respuesta estructural de los elementos. El concreto utilizado para la elaboración de las vigas tenía una resistencia a compresión de 45 MPa, y se utilizó un solo cable de 8 mm Ø, que fue tensado hasta un 80% de su resistencia a tensión, se utilizaron varillas de acero de 6 mm Ø para el refuerzo longitudinal y para los estribos. Para simular el agrietamiento provocado por la corrosión bajo tensión en el cable de preesfuerzo, se dejaron cavidades en el concreto para poder acceder a través de ellas hacia los cables y cortarlos simulando el tipo de falla esperado por la corrosión bajo tensión (Ver Figura 3). La forma de ensayo y la ubicación de las cavidades se muestran en la Figura 4. Con los resultados de los ensayos se realizó un análisis de elemento finito para modelar las diferentes respuestas estructurales de las vigas.

El efecto que tiene la falla del cable en la respuesta estructural global de las vigas depende de la posición del corte del cable con respecto a los efectos de la carga a cortante o a flexión. Cuando el corte ocurre cerca de los apoyos, la porción remanente del cable puede proveer efectos de preesfuerzo residuales, y el acero de preesfuerzo puede seguir activo para resistir efectos de carga. En otros casos, cuando el rompimiento del cable se da en el paño medio de la viga, la pérdida del preesfuerzo es casi nula. Con

respecto al grout, aseguraron que el desarrollo de adherencia de los miembros dependía mucho de las propiedades del grout, por lo cual se debe estudiar con más detalle las influencias de las características y propiedades del grout para ser considerado en el modelado de las respuestas estructurales de miembros adheridos de concreto preesforzado, lo que resalta la importancia de estudiar el grout como material.

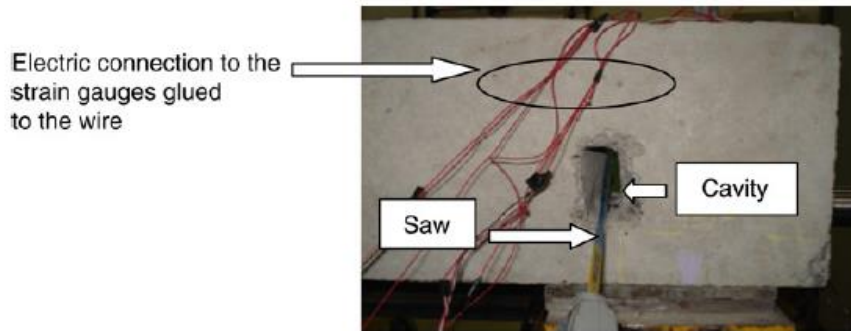


Figura 3 Forma de las cavidades (cavity) en las vigas y de la manera de corte (saw) de los cables [1]

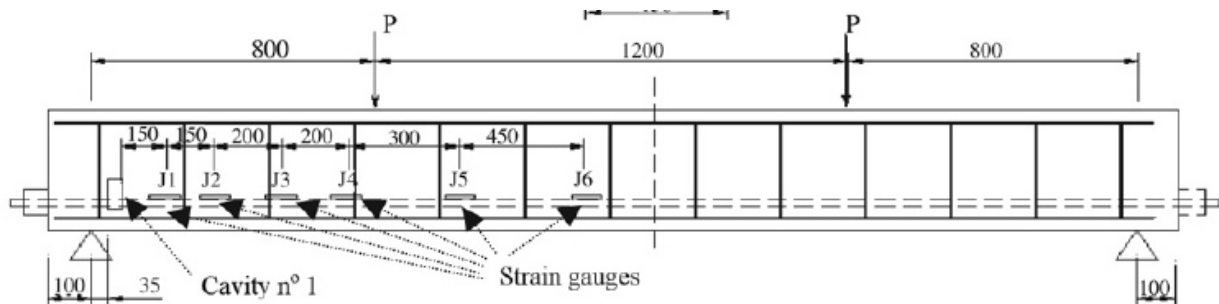


Figura 4 Arreglo de carga y ensayo de las vigas, mostrando las cavidades (cavity) y donde se ubicaron extensómetros (strain gauges) para la medición de las deflexiones [1]

**Hussien O.F. et al.** [17] estudiaron el comportamiento de vigas de concreto de alta resistencia y de resistencia normal, reforzadas con tendones con y sin grout en su interior, las vigas fueron probadas bajo un ciclo de cargas hasta llevarlas a la falla, y así examinar su comportamiento a flexión. Las vigas con tendones que sí contenían grout, fueron grouteadas bajo presión utilizando un grout con una resistencia a la compresión de 35 MPa. El efecto de la condición de grouteo se hizo evidente, al evaluar el comportamiento de las vigas en cuanto a su deflexión bajo carga, que se hizo comparando vigas con condición parcialmente grouteadas, completamente grouteadas, con otras sin grouts y con la mismas resistencias a la compresión del concreto; las cargas de agrietamiento fueron prácticamente las mismas para ambos especímenes, al igual que las cargas máximas, pero la diferencia se observó en que la deflexión máxima bajo la carga de falla

fue superior para la viga parcialmente y completamente grouteada con respecto a la viga sin grout, además la ductilidad de la viga parcialmente y completamente grouteada fue mayor, y su rigidez inicial fue también más alta, debido a la presencia del grout en el tendón.

De nuevo la presencia del grout se hace evidente en la mejora de las capacidades de carga y en las propiedades mecánicas en general, pero se debe indagar más en las características del grout como material y evaluar su influencia en las propiedades medidas en la estructura.

**Wang L. et al.** [18], investigaron el efecto del grouteo insuficiente y la corrosión de los cables de acero en el comportamiento a flexión de vigas de Concreto Preesforzado, con diferentes condiciones de grouteo insuficiente, y también con corrosión en los cables de ductos sin grout. Los especímenes fueron divididos en 2 grupos: el grupo B para evaluar el efecto del grouteo insuficiente en el comportamiento a flexión, y el Grupo PCB para analizar la degradación del comportamiento a flexión debido a la corrosión del cable en un ducto sin grout. Las condiciones de grouteo evaluadas fueron variadas, para el grupo B: B1= Totalmente Grouteada, B2= Sin Grout, B3= grouteado solo en la mitad de la sección transversal, B4= Sin grout en una mitad de la viga. B5= Sin grout en la región central de la viga. El grupo PCB tenía condiciones similares a la B4, con la diferencia que tenía una sección totalmente grouteada con una longitud de 130mm a partir de los anclajes, esto para evitar la corrosión del cable en esta área. Los esquemas de las condiciones de grouteo se muestran en las Figura 5 y Figura 6.

Se empleó un sistema de corrosión artificial, para la obtención de la pérdida de área de los cables para el grupo PCB, por medio de un potencióstato de corriente directa, siendo el cable el ánodo, y una placa de acero inoxidable, sumergida en una solución salina al 5%, el cátodo. La parte de las vigas que estaban insuficientemente grouteadas fue sumergida en la solución salina durante 3 días para permitir que se diera el proceso de corrosión. Para medir la pérdida de área en los cables, se usó una medida destructiva, y se midió el diámetro mínimo residual en los cables. Para la prueba de carga de ambos grupos se utilizó un sistema estático de cargas, las vigas simplemente apoyadas fueron cargadas en 4 puntos distribuidos simétricamente, a unos 600 mm del paño medio de la viga, para la prueba de flexión. Al probar las vigas de ambos grupos bajo carga, se pudo

determinar que el grouteo insuficiente disminuye la adherencia de los cables al concreto, lo que influye en el desempeño estático de las estructuras. La distribución de las grietas en las vigas es sensible a la adherencia existente entre el cable y el grout insuficiente, también depende de la longitud y posición sin grout, el agrietamiento indeseable aparece con el alargamiento del ducto sin grout y con la disminución de la adherencia por la ausencia de grout.

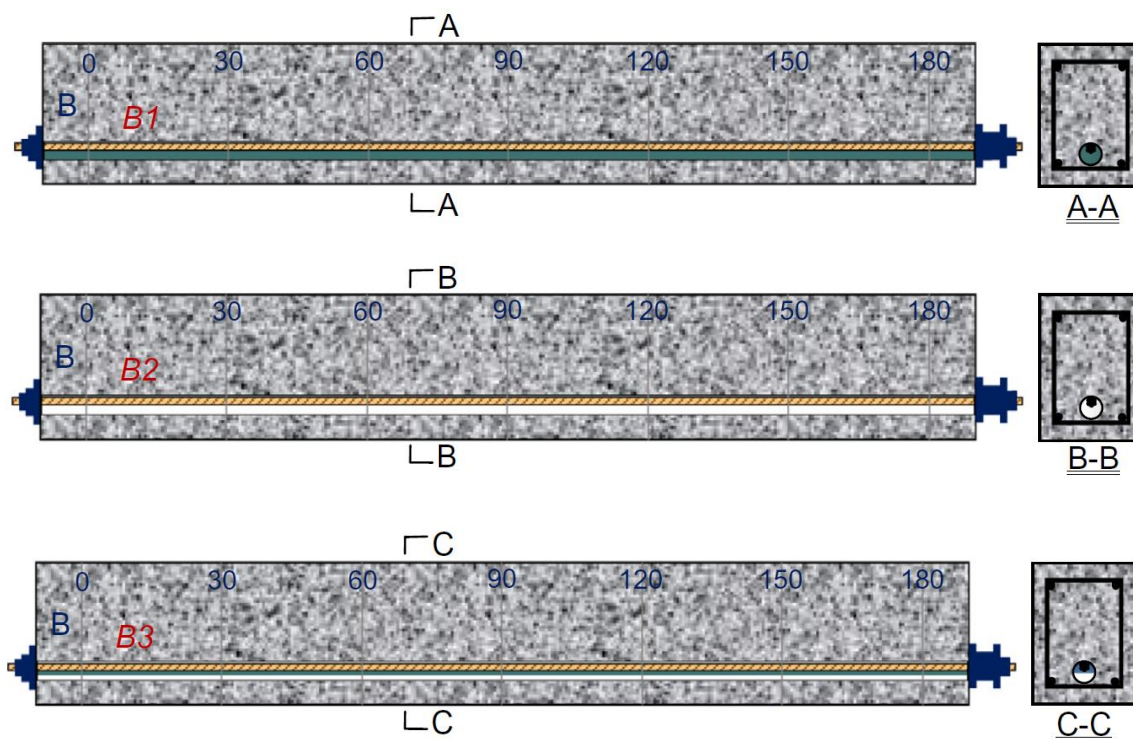


Figura 5 Condiciones de grouteo de las vigas B1-B3 [18]

Se observó además que el grouteo insuficiente reduce la ductilidad de las vigas, la ausencia de grout a lo largo de la viga, reduce significativamente la resistencia última y la rigidez post-agrietamiento. La corrosión de los cables en ductos sin grout, ayuda a la pérdida de pretensión, y disminuyen la carga de agrietamiento en las vigas. Cabe mencionar que los resultados obtenidos, pueden variar en aplicaciones de corrosión normal, debido a que la corrosión electroquímica acelerada fue la empleada en esta investigación.

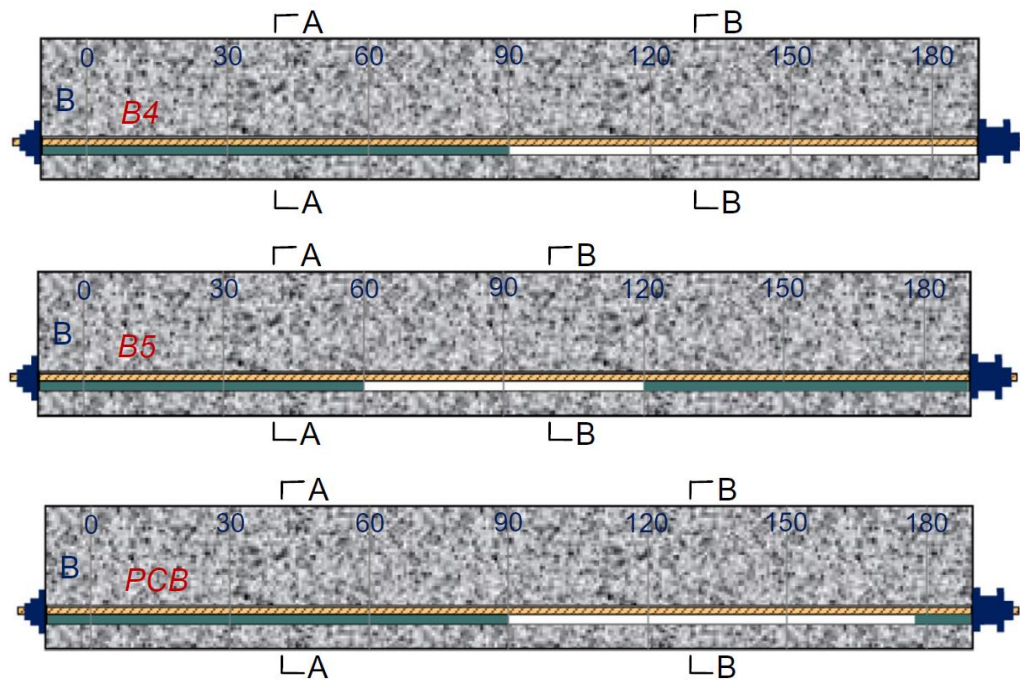


Figura 6 Condiciones de grouteo B4, B5 y PCB [18]

Este es otro ejemplo en el que el proporcionamiento y las características del grout como material no son consideradas, por lo que indagar en estas características y buscar la mejora de las mismas es importante para la investigación.

**Moawad et. al.** [19] evaluaron vigas parcialmente preesforzadas en su comportamiento ante corrosión acelerada, con 40 y 80 MPa de resistencia a compresión, las variables que observaron fueron la resistencia a compresión, el efecto de la localización de la corrosión, el modo de falla, la tensión del acero de refuerzo, agrietamiento, fluencia, carga última y la deflexión correspondiente de cada viga.

Las vigas evaluadas tenían 400x150x4500 mm de dimensiones, y estaban reforzadas con dos barras de 10 mm Ø en la parte superior, tenían estribos de 10 mm Ø @200 mm en el centro de la viga, y @100 mm desde los apoyos hasta una longitud de 1400 mm hacia el centro de la viga, el tendón de preesfuerzo consistía de un torón de 12 mm, que fue grouteado hasta una longitud de 300 mm desde los extremos, la configuración de las vigas se muestra en la Figura 7, mientras que el sistema de corrosión acelerada y la configuración de ensaye se muestran en la Figura 8 y en la Figura 9 respectivamente.



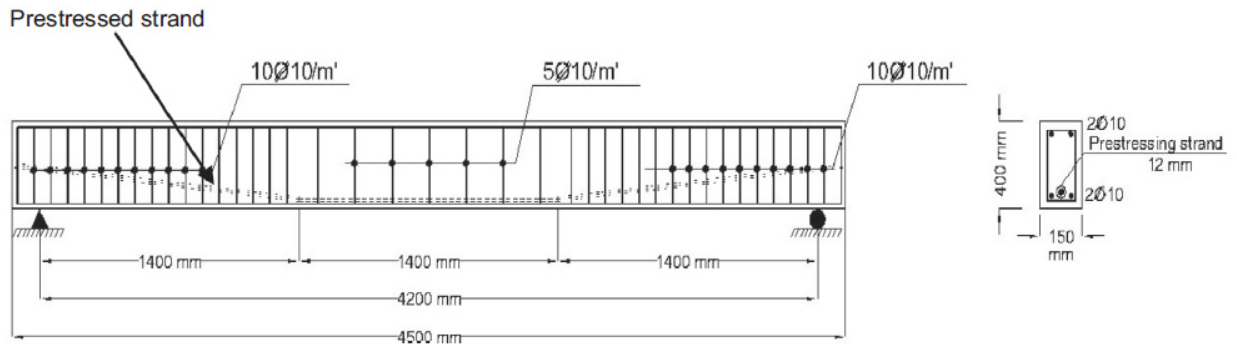


Figura 7 Configuración de armado y dimensiones de las vigas [19]

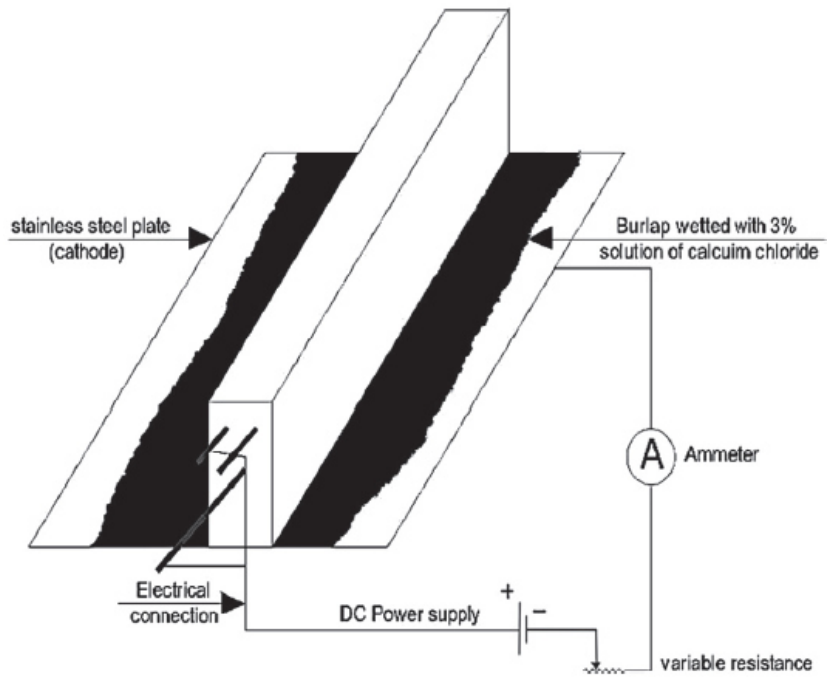


Figura 8 Configuración del sistema de corrosión acelerado [19]

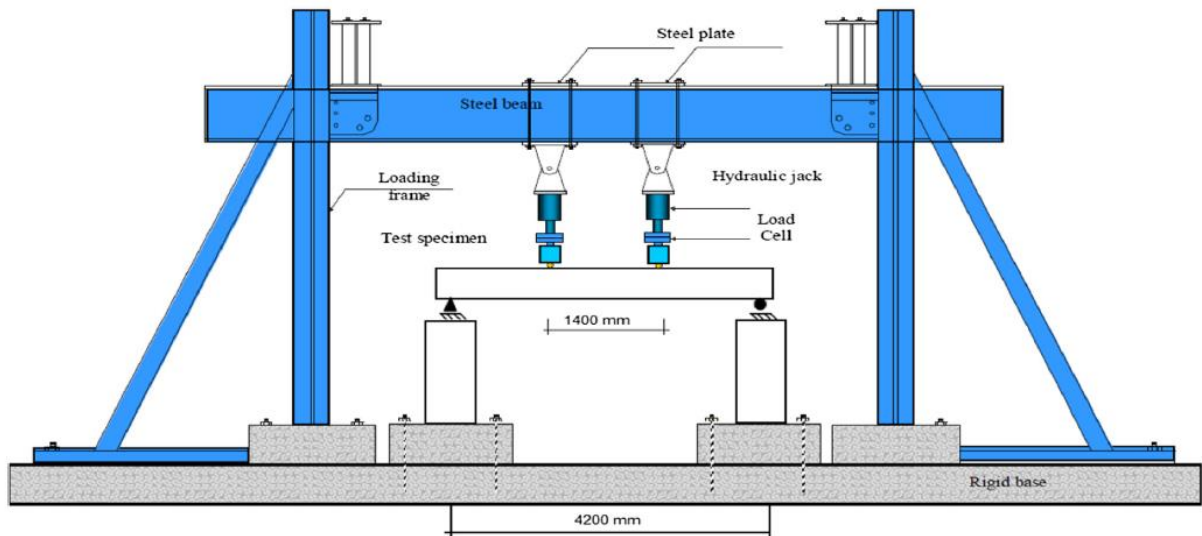


Figura 9 Configuración del arreglo para la aplicación de la carga [19]

En general, la exposición al proceso de corrosión acelerada para todos los especímenes redujo la capacidad a flexión de las vigas parcialmente preesforzadas, así como su rigidez, debido a la corrosión del acero. El mayor deterioro debido a la corrosión, se vió relegado mayormente en el acero de refuerzo convencional (el no preesforzado), debido a que los tendones adheridos (con grout en su interior), son menos propensos a que se corroan, la ocurrencia de la corrosión en torones de acero recubiertos por grouts es muy compleja y se ve influenciada por muchos factores. En esto se infiere a menudo que los ductos rellenos con grouts proveen de una protección multinivel para los torones, el grout de cemento es una barrera ante la humedad y a la penetración de cloruros, a parte que produce un ambiente alcalino que protege el acero; el ducto de plástico sin empalmes y conexiones también genera esta barrera de protección al acero.

### 1.3.2 Efecto de los modificadores de la viscosidad en la difusión de iones (VERDiCT)

**Bentz D.P. et al.** [20] Evaluaron el desempeño de diferentes modificadores de la Viscosidad (MV) en reducir la difusión y conductividad de iones de agentes agresivos que puedan deteriorar las estructuras de Concreto, al agregar apropiados MV nanométricos a la solución de poro de concretos y morteros, se puede reducir el transporte por difusión y conductividad, por el mismo factor, al incrementar la viscosidad con respecto a la viscosidad del agua que está en la solución de poro. Se obtuvieron una variedad de MV potenciales (mostrados en la Tabla 1), incluyendo los dos últimos aditivos, disponibles

comercialmente como ARC, para el estudio preliminar de su desempeño. Se midieron las viscosidades de estos componentes y en algunos casos se prepararon soluciones de los mismos con agua, para lograr un incremento en la viscosidad de la solución con respecto a la viscosidad del agua destilada. A las soluciones acuosas se les determinó la conductividad eléctrica.

Tabla 1 Nombres químicos y masas moleculares de los MV empleados en el estudio

<b>Nombre Químico</b>	<b>Masa Molecular Relativa Estimada</b>
Éter Celuloso	91,000-99,000
Goma de Xantano	1,000,000
Glicerol (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> )	92.1
Polietilenglicol (HO-(CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -O) <sub>n</sub> -H)	400
Polietilenglicol	600
Éter Alquil Polioxialquileno	400-1000
Dipropilenglicol (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub> )	134-190

Con las mediciones de viscosidad de los MV potenciales, se obtuvo una tendencia general de que mientras mayor sea la masa molecular de los aditivos, se necesitará una menor concentración de los mismos para doblar o triplicar la viscosidad del agua destilada, pero como el objetivo del estudio es reducir la conducción/difusión al disminuir la movilidad del ion, este comportamiento no es suficiente. Con los resultados de la conductividad eléctrica se aclaró que algunos potenciadores de la viscosidad son muy efectivos al reducir la conductividad en la solución, mientras que otros no tienen ningún efecto en la reducción de la conductividad, y que básicamente los aditivos con moléculas más grandes como el Éter Celuloso y la Goma de Xantano no tienen ninguna influencia en la conductividad de las soluciones, aunque si la hayan tenido en la viscosidad. Mientras que los aditivos con moléculas más pequeñas, en la escala nanométrica, como el glicerol, los polietilenglicol, y los comercialmente disponibles como reductores de la contracción, son altamente efectivos en la disminución de la conductividad.

De esta investigación se toma el uso de un éter alquil polioxialquileno, que se encuentra disponible comercialmente como un ARC, combinando las funciones del mismo para evitar agrietamientos debidos a la contracción, así como de modificar la viscosidad en la solución de poro para disminuir la difusión de iones como los cloruros.

**Bentz D.P. et al.** [21] Desarrolló la tecnología VERDiCT (Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology), que consiste en introducir en mezclas de concreto y mortero, aditivos modificadores de la Viscosidad que normalmente están disponibles en el mercado como ARC, estos modificadores de la viscosidad son cuidadosamente seleccionados para incrementar substancialmente la viscosidad del poro en concretos y morteros, aumentando así su durabilidad. El principio detrás de esta tecnología se basa en una ecuación que dice que la difusión de un electrolito es inversamente proporcional a la viscosidad de la solución, esta ecuación es la de Stokes-Einstein:

$$D_0 = \frac{K_B T}{6\pi N_0 r} \quad (1)$$

Donde:

$K_B$  = Es la constante de Boltzman (Constante que relaciona temperatura, absorción y energía) =  $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/K =  $1.3806504 \times 10^{-46}$  ergios/K.

$T$  = Temperatura

$r$  = es el radio de la partícula difusora.

$N_0$  = Es la viscosidad de la masa de la solución

Este principio propone que mientras más pequeñas sean las moléculas de la solución que modificará la viscosidad, menor será el radio de difusión de los iones, es por eso que las nanopartículas son las mejores para ser usadas como modificadores de la viscosidad y reducir la difusión. Se emplearon 3 métodos para esta tecnología:

- Internamente como aditivo de la mezcla.
- Superficialmente como parte del componente de curado.
- Internamente usando agregados porosos y ligeros saturados como vehículo.  
(FLAIR)

Estos métodos se utilizaron en mezclas de mortero con una relación a/c= 0.40 y con un éter alquil polioxialquilenos como modificador de la viscosidad y se aplicaron los 3 métodos mencionados anteriormente. Se elaboraron cilindros de 50mm de diámetro y

100mm de altura y se curaron en sus moldes por 1, 7 y 28 días y fueron colocados en recipientes sellados de plástico, expuestos en soluciones de 1 mol de iones cloruro.

Para los tiempos de curado de 7 y 28 días después de ser desmoldados a un día, se curaron en 3 condiciones diferentes: la primera, en una solución de NaOH/KOH/Ca(OH)<sub>2</sub>, la segunda con la misma solución de hidróxidos pero junto al aditivo VERDiCT, y la tercera (aplicada solo en los especímenes con el método FLAIR) curados en dobles bolsas plásticas selladas. Para el método FLAIR el agregado ligero fue presaturado en una solución con 50% del aditivo en agua y un poco de la arena de peso normal fue reemplazado por este agregado. Los diferentes especímenes fueron evaluados para determinar la penetración de los iones cloruro, demostrando grandes beneficios de la aplicación de la tecnología para reducir la penetración de estos agentes como se muestra en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12.

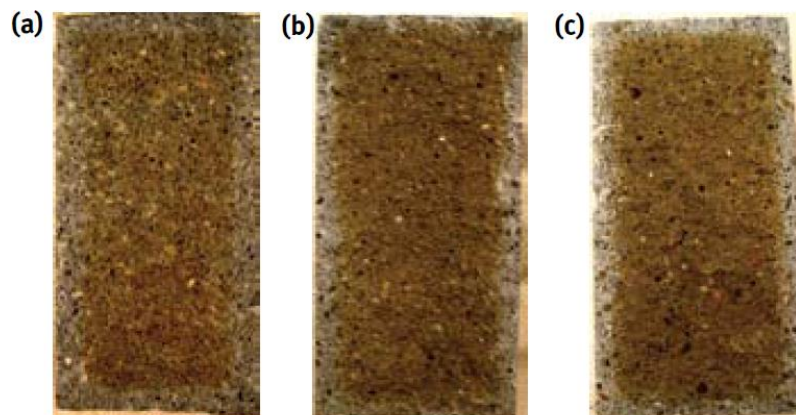


Figura 10 Cilindros curados por 7 días y luego expuestos por 28 días a la solución de cloruro, el color café indica el área con menor concentración de cloruros. (a) Mezcla sin VERDiCT, (b) Mezcla con VERDiCT en el agua de mezcla y (c) Mezcla con VERDiCT agregado por el método FLAIR [21]

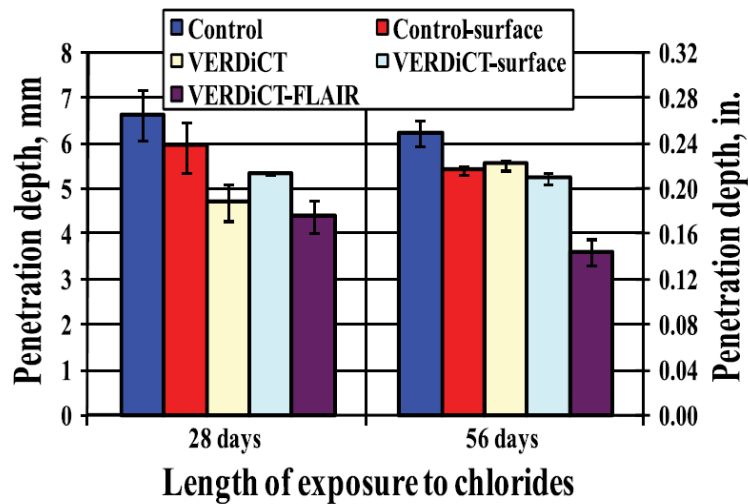


Figura 11 Penetración de Cloruros en Morteros curados por 7 días, Surface indica el curado en una solución de hidróxidos con y sin el aditivo VERDiCT, y FLAIR indica el curado en condiciones selladas [21]

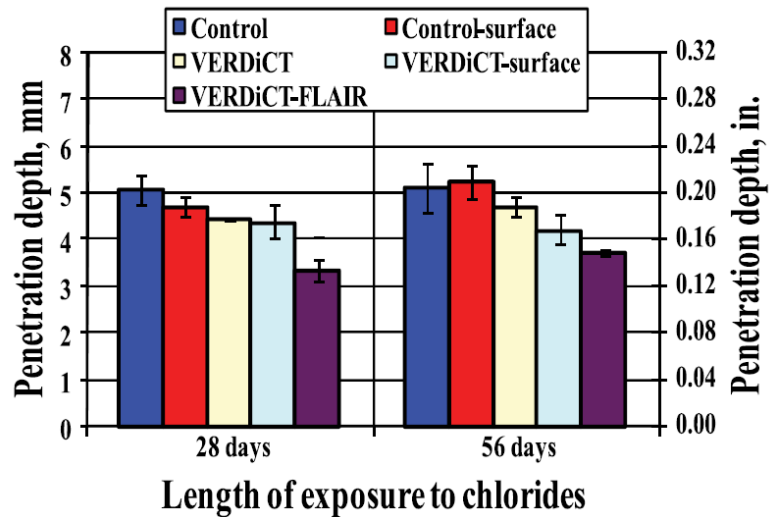


Figura 12 Penetración de Cloruros en Morteros curados por 28 días, Surface indica el curado en una solución de hidróxidos con y sin el aditivo VERDiCT, y FLAIR indica el curado en condiciones selladas [21]

En general los resultados indican el beneficio de la tecnología en la disminución de la penetración con respecto a los morteros de control, y que el método FLAIR es el que funciona de manera más efectiva.

En esta tecnología se basa la metodología utilizada en la investigación, siendo un ARC el aditivo MV, utilizando el método FLAIR (Agregado ligero saturado), como vehículo del curado interno mejorado, esta tecnología solo se ha aplicado en concretos y morteros,

por lo cual surge la necesidad de probarla en grouts, y evaluar la interacción del grout con el curado interno mejorado con acero de alta resistencia utilizado como acero de preesfuerzo.

**Bentz D.P. et al.**[3], Con el mismo principio de utilizar modificadores de la viscosidad (MV) en escala nano, para aumentar la viscosidad en la solución del poro del concreto, y proporcionalmente disminuir las tasas de difusión de agentes agresivos como los iones cloruro y sulfatos, se evaluó el uso de un aditivo modificador de la viscosidad en mezclas de mortero, el aditivo fue empleado en 2 diferentes condiciones: combinado con el agua de mezcla y vía FLAIR. Se buscó comparar el desempeño del aditivo modificador de la viscosidad en los morteros, junto con otra mezcla de mortero con una sustitución de agregado ligero saturado solamente en agua por agregado fino de peso normal. También se realizaron mezclas de mortero con agregado fino de peso normal únicamente.

Para la evaluación de los morteros se realizaron especímenes cilíndricos que fueron curados a edades de 7 y 28 días, y después de curados fueron sumergidos en una solución con iones cloruro a razón de 1 mol/L y almacenados individualmente en recipientes de plástico sellados. Después de los 28, 56, 180 y 365 días de exposición, 2 cilindros de cada mezcla fueron sacados y fueron divididos longitudinalmente, a cada espécimen se le roció una de las caras con Nitrato de Plata, luego fueron fotografiados y evaluados con un software para determinar la profundidad a la que ingresó el cloruro. Además se le midió la velocidad de hidratación utilizando Calorimetría Isotérmica y Semi-adiabática.

Como se muestra en la Figura 13 con cilindros curados por 28 días y expuestos en la solución de cloruro por 365 días, en ambos casos de uso del Modificador de la Viscosidad (en el agua de mezcla y vía FLAIR), se observó una profundidad menor de penetración de los iones cloruro.

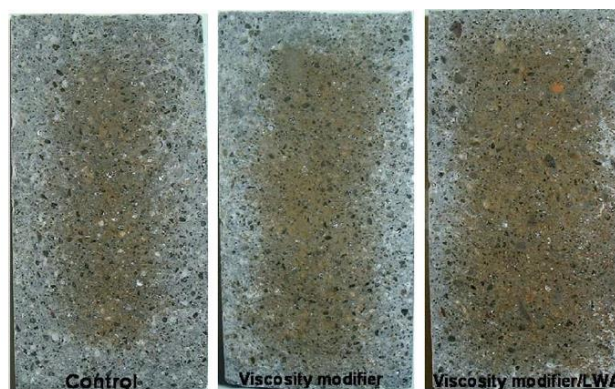


Figura 13 Imágenes de los cilindros de mortero (el primero de control, el segundo con el MV en el agua de mezclado, y el tercero con el MV vía FLAIR) el color gris indica la profundidad de penetración de los iones cloruro en los especímenes [3]

Los resultados de las pruebas de calorimetría isotérmica arrojaron que en ambos casos del uso de MV, tanto en el agua de mezcla como vía FLAIR, se observó una disminución en la velocidad de hidratación, cambiando el pico principal de hidratación, pero en menos de 2 horas. Este pequeño retardo está ligado al incremento de la viscosidad en la solución del poro, disminuyendo el proceso de disolución y difusión que contribuyen a las reacciones de hidratación en edades tempranas. En general con el uso de MV en ambas condiciones se observó una disminución tanto en la velocidad de hidratación y en la profundidad de difusión de los iones cloruro, lo que en conclusión sugiere un beneficio en duplicar la vida útil de las estructuras de concreto.

De esta investigación se toma la medición de la cinética de hidratación por medio de calorimetría isotérmica, con el objetivo de observar la influencia del curado interno mejorado en el proceso de hidratación, mostrando retardos o aceleraciones en los picos de hidratación de los grouts, de nuevo en esta investigación no se evalúan especímenes con acero, lo que representa un área de oportunidad para evaluar esta tecnología en los grouts y su interacción con el acero de preesfuerzo.

**Bentz, D.P. et al.**[11], evaluaron el comportamiento de 4 mezclas de mortero bajo la exposición de sulfatos, todas las mezclas fueron preparadas con una relación a/c de 0.485 y un 55% en volumen de arena, para la mezcla de control solo arena de peso normal fue empleada, al igual que para la mezcla con el aditivo reductor de la contracción (MV), con la diferencia de que el aditivo fue agregado en el agua de mezcla, se preparó otra mezcla para curado interno reemplazando una porción de la arena por agregado ligero saturado con agua, y una última mezcla tanto con curado interno como con MV se



preparó también sustituyendo una porción de la arena por agregado ligero saturado en una solución de agua con el MV. Para cada mezcla se elaboraron barras para evaluar la expansión, y se elaboraron cubos para probar su resistencia a la compresión. Las barras de mortero fueron colocadas en una solución de sulfatos y se midieron sus expansiones durante 1, 2, 3, 4, 8, 13, 15 semanas y 4, 6, y 9 meses, además se les midió la masa, y la resistividad en la superficie periódicamente.

En los resultados de la expansión se observó que la mezcla de control obtuvo mayores expansiones en las diferentes semanas, seguido de la mezcla con el MV en el agua de mezcla, la mezcla con curado interno con agua obtuvo menores expansiones que la del MV en el agua de mezclado, pero en general la que mejores resultados y menores expansiones obtuvo, fue la mezcla del curado interno junto con el MV. Esta reducción de la expansión puede estar ligada a varios procesos, la expansión depende de la difusión/sorción de sulfatos en las barras de mortero, que reacciona con el hidróxido de calcio en el interior y con las fases de aluminato, por lo que el desempeño combinado del MV, junto con la hidratación adicional que brinda el Curado Interno, disminuyeron los procesos de difusión y sorción como se ha observado en otros estudios en ataques de cloruros. Para el caso de los sulfatos puede significar la formación de una capa más densa de productos de reacción formados en la superficie de las barras, lo que reduce el ingreso más profundo de los iones dentro del espécimen.

Para ambas mezclas tanto la del MV en el agua de mezclado y la de curado interno solo con agua, se obtuvieron menores aumentos en la masa con respecto a la mezcla de control en edades de exposición entre 1 y 4 semanas, en este mismo periodo, las resistividades de los mismos fueron aumentando. Ambas mediciones son consistentes a la formación inicial de una capa más densa en ambos especímenes. La mezcla de curado interno con el MV, fue la que mayor aumento de masa obtuvo, pero produjo una expansión pequeña, esto es debido a la presencia del agregado ligero poroso y al ligero retardo en la hidratación por el MV, lo que resulta en un mortero con una porosidad inicial que ayuda al ingreso de los sulfatos, pero en semanas posteriores se fue disminuyendo el aumento de la masa, con respecto a la mezcla de control.

### 1.3.3 Curado interno en concretos y morteros

**Bentz, D.P. et al.**[22], Debido a los problemas de hidratación en concretos de alto comportamiento, por su baja relación a/c, se evaluó el uso de agregado fino ligero saturado para proveer el agua necesaria para la hidratación del cemento (Curado Interno) en este tipo de concretos; en primer lugar dedujeron una ecuación para el cálculo de sustitución de agregado ligero para asegurar una cantidad de agua adecuada para completar el curado, o sea lograr que el cemento alcance su máximo grado de hidratación. Esta ecuación consideró la contracción química producida por el cemento al hidratarse, al igual que la cantidad de cemento a hidratar y el grado de hidratación esperado. Pero observaron que no era suficiente calcular cuánto agregado ligero utilizarían para la hidratación, sino que el agua debía estar disponible y lo necesariamente cercana a la pasta de cemento para lograr esa hidratación, por lo que realizaron unos estudios de la microestructura de concretos de alto comportamiento para evaluar el desempeño del curado interno en la hidratación. Al evaluar la microestructura para conocer el volumen de pasta de cemento encontrada a cierta distancia de la superficie del agregado fino ligero, determinaron que con una buena distribución de las partículas de agregado ligero se darían más beneficios para el curado del concreto.

Esta investigación muestra los primeros indicios del cálculo de agua necesaria para el curado interno, aunque sólo se probó un vehículo (agregado ligero), se confirmó la efectividad de la tecnología. Lo destacable es que la distribución de los agregados o del vehículo de curado interno debe ser uniforme, por lo que en el caso de los agregados ligeros, se debería buscar que su granulometría sea la más compatible con la del agregado de peso normal, para que su distribución sea uniforme.

**Lura, P. et al.**[23], Evaluaron las características de un agregado ligero, específicamente una pumicita para conocer su microestructura, su porosidad, su absorción y desorción, utilizando diferentes técnicas de caracterización. Se estudiaron diferentes fracciones de la pumicita, por medio de SEM, se observó que el tamaño de los poros variaba entre cientos de micras a unas pocas micras, además de encontrar una porosidad entre el 40% y 50%, la forma de los poros era muy variada e irregular, pero que tenían una buena conexión entre sí. Además se midió la absorción de las diferentes fracciones, y se observó que mientras más grandes eran las fracciones mayor era su absorción, en cambio en términos de desorción, las fracciones más pequeñas perdían el

80% del agua absorbida, mientras que las fracciones más grandes perdían solo el 50%, factor importante para el curado interno. También probaron el desempeño de la pumicita como vehículo de curado interno en mezclas de mortero, y comprobaron resultados en diferentes pruebas. Se elaboraron 3 mezclas con diferentes proporciones de pumicita saturada, una con 0% del volumen de mortero, otra con 4% y otra con 8%. El diseño de las mezclas con pumicita se realizó considerando la cantidad de agua necesaria para evitar la autodesecación.

Se midió la contracción autógena de las 3 mezclas de mortero, resultando en que la contracción de la mezcla con el 8% de pumicita fue  $\frac{1}{4}$  de la obtenida en el mortero de referencia, y fue  $\frac{1}{3}$  de la obtenida en el mortero con 4% de pumicita; además se determinó que el 4% de pumicita no fue suficiente para evitar la autodesecación. Se evaluó la resistencia a la compresión de las 3 mezclas, y en general las mezclas con pumicita tuvieron mayores resistencias en comparación con las de referencia, siendo la del 8% de pumicita la que mayor resistencia obtuvo, esto debido a la mayor hidratación proveída por el curado interno, y por la ausencia de agrietamiento debido a la contracción autógena.

Este trabajo no propuso las sustituciones de pumicita en base a un cálculo de agua de curado interno necesaria para la hidratación completa del cemento, lo destacable es la caracterización minuciosa que se le hizo a la pumicita, lo que permite el uso de su metodología para la caracterización del agregado ligero que también es una pumicita, utilizado en esta investigación.

**Geiker, M.R. et al.**[24], Probaron dos fuentes de curado interno en morteros, una, por la sustitución de arena por agregado ligero saturado, y otra con la adición de Polímeros Súper absorbentes (SAP). Los morteros fueron preparados con una relación  $a/c= 0.35$  y una sustitución del 8% de la masa del cemento por Humo de Sílice. La mezcla de mortero de referencia contenía solamente arena de peso normal, y las de curado interno; una, contenía un 8% de agregado ligero, otra 20% de agregado ligero, y por último una mezcla contenía un 0.4% (en masa del cemento) de SAP. Todos los morteros contenían de 10g a 25g de un aditivo superplastificante para requerimientos de trabajabilidad.

A todas las mezclas de mortero se le realizaron pruebas de resistencia a la compresión, con cilindros curados en condición sellada a edades de 7 y 28 días, además se les evaluó la humedad relativa interna (RH), y también se les midió la deformación autógena. Como resultados, en las 3 mezclas con curado interno, se observó que la RH se mantuvo más alta en comparación con el mortero de referencia, durante todo el proceso de hidratación.

El suministro de agua adicional proporcionado por el curado interno, favoreció en la mitigación de la contracción autógena, ya que las 3 mezclas con curado interno, disminuyeron significativamente la contracción autógena, y para el caso del agregado ligero en un 20% se eliminó completamente la contracción autógena, por brindar una mayor cantidad de agua adicional. Aunque el mortero con SAP y el de agregado ligero en un 8%, proveían de la misma cantidad de agua adicional, los SAP son más eficientes en la reducción de la contracción autógena a mayores edades, debido a su distribución más homogénea del agua de curado extra observado en la microestructura del mortero.

Se observó también que para los morteros que mantuvieron su RH más alta, tuvieron mayores aumentos en su resistencia a la compresión, consecuencia de los vínculos entre la humedad disponible, las tasas de hidratación y el desarrollo de resistencia, lo que sugiere otro beneficio del curado interno, además de reducir o eliminar la contracción autógena, produce un incremento en el grado de hidratación y potencialmente un aumento en la resistencia a la compresión (y permeabilidad y difusión más baja), bajo condiciones de curado sellado.

En este trabajo se utilizaron dos diferentes vehículos de curado interno, pero se dosificaron de manera arbitraria, importante es saber que una dosificación adecuada de agregado ligero puede proporcionar una cantidad de agua de curado igual a la de un SAP, otro factor importante es que los beneficios en la ganancia de resistencia a compresión de los especímenes con curado interno se ven mayormente reflejados en condiciones de curado sellado.

**Bentz, D.P. et al.**[25], Realizaron estudios para proponer una forma de dosificar una mezcla para el desarrollo del curado interno, por lo que propusieron una fórmula para calcular la cantidad de agregado ligero que sustituirá una porción del agregado de peso normal, para proporcionar la cantidad de agua necesaria para la completa hidratación del

cemento contenido en una mezcla de concreto o mortero. En dicha fórmula, intervienen diferentes factores, como el contenido de cemento en masa, la contracción química producida por masa de cemento, el grado de hidratación del cemento máximo esperado para diferentes relaciones a/c, el grado de saturación del agregado ligero, y por último la absorción del agregado ligero.

Además propusieron una serie de tablas para el cálculo de la contracción química del cemento, luego de conocer las diferentes fases encontradas en diferentes tipos de cemento. Formularon un proceso experimental para calcular la absorción y desorción del agregado ligero, ya que es importante conocer estas características para determinar si el agregado ligero proporcionará el agua adicional necesaria para una completa hidratación del cemento, y en el tiempo necesario, para poder asegurar los beneficios que el Curado Interno brinda a las mezclas de concreto y mortero.

Este trabajo sirvió de referencia para la elaboración de la norma ASTM 1761 [26], que sirve para la caracterización y la dosificación del agregado ligero para proporcionar la cantidad adecuada de curado interno para mitigar la contracción química del cemento y obtener un grado de hidratación esperado, esta norma se utilizó para el diseño del proporcionamiento de mezcla del grout con curado interno.

**Bentz, D.P. et al.**[27], Prepararon mezclas de mortero con relaciones a/c=0.4, con y sin curado interno, el curado interno se suministró por medio de agregado ligero saturado en agua, sustituyendo una porción del de arena de peso normal. El mortero de referencia (sin curado interno) tenía solamente arena de peso normal. Se pretendió evaluar la influencia del curado interno en la filtración de iones cloruro en la zona de transición interfacial, además de otras características. Con los morteros se prepararon cilindros que fueron curados durante 7 y 28 días, y después fueron colocados en recipientes de plástico sellados, con una solución de iones cloruro, y fueron expuestos durante 28, 56, 180, y 365 días. Se aplicó el método de rociado de nitrato de plata en las caras de los cilindros, que previamente fueron divididos longitudinalmente, para evaluar las profundidades de penetración de los iones cloruro en los morteros. Se experimentó por separado con muestras secas de 100 g de arena de peso normal y de agregado ligero expuestas a 500 ml de agua destilada y de una solución con iones cloruro, para determinar la absorción y la liberación de iones cloruro de los agregados. Los resultados

no mostraron absorción o liberación significativa de iones cloruro durante 28 días de la prueba, en ninguno de los agregados, lo que significa que ninguna reducción en la penetración de los iones cloruro en los morteros pudiera ser causada por la absorción de los mismos por los agregados.

Como resultados se obtuvieron menores profundidades de penetración de iones cloruro en los morteros con curado interno, en comparación con los de referencia. El coeficiente de difusión de iones cloruro en los morteros con curado interno fue de solo de entre el 55% y 75% de el de los morteros de referencia. La fracción de volumen pasta infiltrada en la zona de transición interfásica en los morteros con curado interno, fue del 60% de la del mortero de referencia, esta reducción en la filtración o el volumen de esta zona, produce un 22% de reducción en la difusión en los morteros con curado interno, contra el de referencia.

Por medio de calorimetría isotérmica se observó una mejor hidratación en los morteros con curado interno, ya que indicaron un 5% de aumento en el calor liberado (grado de hidratación). Además de una mejor hidratación, los morteros con curado interno lograron una microestructura más densa a edades de 120 días. Todos estos resultados sugieren que los morteros con curado interno reflejaron una difusión de entre el 55% y el 75% de la de los morteros de referencia sin curado interno.

**Durán-Herrera, A. et al.** [9], Evaluaron 7 mezclas de concreto para ser evaluadas a condiciones de exposición de CO<sub>2</sub> natural y acelerada, las mezclas consistían en lo siguiente: la de control, contenía cemento, agregado grueso, arena de peso normal y un aditivo reductor de agua (presente también en las otras mezclas); la mezcla con Curado Interno (IC) contenía una sustitución del 20% del volumen de la arena de peso normal, por una pumicita de peso ligero saturada solo con agua; la mezcla con SRA, contenía un 1.5% por masa de cemento de un aditivo reductor de la contracción (MV) en el agua de mezcla; la mezcla con IC+SRA combinaba las características de las 2 mezclas anteriores; la mezcla VERDiCT contenía pumicita saturada en una solución de agua y SRA; las últimas 2 mezclas denominadas FA y FA-VERDiCT, eran equivalentes a las mezclas de control y VERDiCT, con la diferencia que ambas contenían una sustitución del 20% en masa de cemento por ceniza volante. Con las mezclas se elaboraron cilindros para probar su resistencia a la compresión y prismas para exponerlos a la carbonatación. Los

especímenes para la carbonatación natural se colocaron en estantes metálicos en un ambiente industrial rico en CO<sub>2</sub>, los expuestos a carbonatación acelerada se colocaron en una cámara de carbonatación con condiciones de exposición controladas.

Las resistencias a la compresión fueron medidas a edades de 14, 28, 90, y 180 días, y los resultados arrojaron que las mezclas IC, SRA, IC+SRA, y VERDiCT obtuvieron resistencias menores a las de la mezcla de control, aunque las diferencias disminuyeron a edades entre los 90 y 180 días, las resistencias menores se deben a la presencia del agregado ligero poroso, y al retardo producido por el aditivo SRA, mientras que la disminución de las diferencias a edades mayores se atribuyen a la mayor hidratación, y a la densificación de la matriz debido al curado interno. El mismo comportamiento se observó en la mezcla FA-VERDiCT comparada con la mezcla FA.

En las condiciones de exposición acelerada, los coeficientes de carbonatación fueron de 2 a 2.5 veces los coeficientes en la condición natural de exposición, los resultados indican que la mezcla SRA mostró retardo en el tiempo necesario para que el frente de carbonatación alcanzara una profundidad de 25mm en 35%, mientras que la mezcla IC+SRA, lo logró en un 16%. Las mezclas VERDiCT e IC, requirieron tiempos similares o menores para alcanzar esa profundidad de carbonatación, con respecto a la mezcla de control. La mezcla IC comparada con la de control, aceleró el avance de la carbonatación en un 20%, debido a que el agregado ligero poroso puede proveer un modo adicional de ingreso del CO<sub>2</sub>.

## **1.4 Justificación**

Como se ha mencionado anteriormente, el problema del deterioro de las estructuras de concreto preesforzado debido a la corrosión del acero tiene mucha importancia, los efectos que este problema genera tienen repercusiones en muchos ámbitos, incluyendo el económico; actualmente se estima que los costos relativos al mantenimiento o reparación de infraestructura de concreto por corrosión se elevan alrededor de los US\$100 billones por año en el mundo [28], y debido a que el tipo de falla de las estructuras de concreto preesforzados es abrupta y sin previo aviso, la prevención del problema es de suma importancia. Las investigaciones anteriores nos confirman que el uso de los grouts afecta en gran medida este fenómeno, ya que el grout funciona como última barrera protectora para el acero ante la corrosión.

Estas investigaciones [1, 16–19], sin embargo, se centran más en las propiedades mecánicas de las estructuras con o sin grout, que en las características del grout como material o en tecnologías para mejorarlo, algunos autores [12–15] evaluaron las características de los grouts como material, pero sus enfoques eran limitados al uso de humo de sílice y de aditivos en diferentes proporciones. La escasa literatura e investigación existente sobre el desempeño de los grouts en sus propiedades mecánicas y de durabilidad proporciona un área de oportunidad para evaluar otras tecnologías para ser aplicadas en los grouts utilizados en tendones de preesfuerzo para su evaluación como protector del acero ante la corrosión.

Una de las tecnologías aplicables para este fin es el curado interno mejorado, que como se mencionó anteriormente, ayuda tanto a mitigar la contracción autógena en mezclas con bajas relaciones a/c, lo que implica un beneficio en la durabilidad al evitar los agrietamientos generados por las contracciones de estas mezclas, estos agrietamientos significan vías de acceso para iones como los cloruros, que al llegar hasta el acero pueden promover su corrosión; otro beneficio en cuanto a la durabilidad de mezclas con curado interno mejorado es la modificación de la viscosidad de la solución de poro brindada por esta tecnología, como se observó anteriormente [21].

El principio de esta tecnología es que al aumentar la viscosidad de la solución de poro de una mezcla, la difusión de iones como los cloruros disminuye proporcionalmente, según los antecedentes, esta tecnología solo se ha utilizado en mezclas de morteros y concretos, obteniendo importantes resultados en cuanto a la mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad de estas mezclas. Como el fin de los grouts es proteger al acero de preesfuerzo de su corrosión, la tecnología del curado interno mejorado se puede aplicar para mejorar las características y propiedades de los grouts como protectores del acero ante la corrosión, esta investigación pretende lograr este objetivo utilizando un agregado ligero saturado en una solución de agua y un aditivo modificador de la viscosidad que a su vez es un reductor de la contracción como vehículo del curado interno mejorado.



## **1.5 Hipótesis**

El curado interno mejorado aplicado a un grout por medio de un agregado ligero saturado en una solución de agua y un aditivo reductor de la contracción, disminuirá el ingreso y los mecanismos de transporte de los iones cloruro, comparado con otros sin curado interno, comerciales y de laboratorio, funcionando como protector ante la corrosión del acero de preesfuerzo.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo General**

Evaluar el efecto del curado interno mejorado por medio de agregado ligero saturado en una solución de agua y aditivo reductor de la contracción, en grouts utilizados en tendones de preesfuerzo; en cuanto a la permeabilidad, mecanismos de transporte de iones cloruro, y propiedades mecánicas; comparando su comportamiento con grouts comerciales y de prueba sin curado interno..

### **1.6.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar el efecto del curado interno en el proceso de hidratación, midiendo la cinética y calor de hidratación de los grouts por medio de pruebas de calorimetría Isotérmica.
- Determinar el tiempo de fraguado de grouts con y sin curado interno por medio de su resistencia a la penetración, de acuerdo a la norma ASTM C953.
- Evaluar la influencia del curado interno mejorado en la mitigación de la contracción autógena, midiéndola por medio de la norma ASTM C1698.
- Evaluar el efecto del curado interno mejorado en la resistencia a la compresión de especímenes de los diferentes grouts, ensayándolos como en la norma ASTM C109.
- Determinar el efecto del curado interno mejorado en las propiedades de durabilidad de los grouts, evaluando potenciales y velocidades de corrosión por medio de pruebas electroquímicas, resistividad superficial, y permeabilidad rápida a los iones cloruro.

# **CAPÍTULO II MARCO REFERENCIAL**

## **2.1 Concreto preesforzado**

### **2.1.1 Historia**

El preesfuerzo del concreto es un principio que se viene utilizando desde hace varias décadas, y proviene del concepto de que el concreto es muy resistente a esfuerzos de compresión pero a la vez muy débil a tensión o tracción, por lo que se consideró que al preesforzar el acero contra el concreto, produciría en el concreto un esfuerzo mayor de compresión que ayudaría a equilibrar otros esfuerzos a tensión provocados por cargas muertas y vivas. Para iniciar podemos citar el concepto del Comité de Concreto Preesforzado del ACI que define al concreto preesforzado como un concreto en el cual han sido introducidos esfuerzos internos de tal magnitud y distribución que los esfuerzos resultantes de las cargas externas dadas se equilibran hasta un grado deseado [29].

Hablando un poco de historia, en 1886 se dio el primer indicio de concreto preesforzado cuando P.H. Jackson en Estados Unidos patentó el uso de varillas de acero atadas a piedras artificiales y en arcos de concreto para usarlas como losas de pisos, por otro lado en 1888, Doehring en Alemania patentó un concreto reforzado con metal que tenía un esfuerzo de tensión aplicado antes de que la losa fuera cargada. Desafortunadamente estas aplicaciones no dieron resultados por el bajo preesfuerzo producido en el acero que pronto se perdía debido a la contracción del concreto. Cabe mencionar que en los años de 1908 y 1925 respectivamente, los ingenieros C.R. Steiner y R.E. Dill, ambos de Estados Unidos propusieron cada uno una forma de postensado de cables de acero de mayor resistencia para recuperar las pérdidas de esfuerzo debido a la contracción del concreto, pero ambos métodos no se aplicaron en escalas significativas principalmente por el factor económico [30].

Se le atribuye al francés Freyssinet el desarrollo moderno del concreto preesforzado, ya que fue él quien realizó estudios considerando las propiedades de los materiales, especialmente con la utilización de cables de acero con grandes resistencias y que llegó a patentar para 1930 la idea del concreto pretensado, por lo que se le considera “el padre del concreto pretensado” [31].

### **2.1.2 Ventajas y desventajas del concreto preesforzado**

Se pueden mencionar múltiples ventajas que presenta el concreto preesforzado frente al concreto reforzado, se mencionarán algunas a continuación:

- Durabilidad y bajo mantenimiento.
- Moldeabilidad a cualquier forma incluyendo superficies curvas dobles.
- Rigidez contra la flexión y deformación.
- Propiedades favorables de fatiga, bajo un gran número de repeticiones cíclicas, como las producidas por las olas en el mar.
- Excelente comportamiento bajo impacto a temperaturas bajas.
- Resistencia a la abrasión por hielo o arena en movimiento.
- Facilidad en la reparación de daños locales.
- Disponibilidad a nivel mundial de materiales adecuados.
- Es más adecuado para estructuras de claros grandes y para aquellas que soporten cargas pesadas.
- Debido a que en las estructuras de concreto preesforzado, durante el preesforzado, tanto el concreto como el acero están sujetos a los esfuerzos más altos que existirán en ellos durante su vida de servicio, por consiguiente, si los materiales pueden soportar el preesforzado, seguramente poseen la resistencia suficiente para las cargas de servicio.
- Cuando se han diseñado apropiadamente las estructuras de concreto preesforzado tienen capacidades de sobre carga similares y quizás ligeramente superiores a las del concreto reforzado.
- Puesto que los materiales son de mayor resistencia, se requieren cantidades menores de materiales, acero y concreto, para soportar las mismas cargas.
- El peso reducido del miembro ayudará para economizar las secciones, la menor carga muerta y profundidad de los miembros resultará en un ahorro de materiales de otras porciones de la estructura.
- En los miembros precolados, una reducción de peso ahorra costos de maniobras y transportes.[30, 32]

## **Desventajas del concreto preesforzado**

- Aunque en los miembros de concreto preesforzado se observa un ahorro en cuanto a la cantidad de materiales empleados con respecto al concreto reforzado, dicho ahorro se ve balanceado por el alto costo de los materiales de mayor calidad
- La protección del acero contra la corrosión es más crítica, debido a que el esfuerzo del preesforzado se puede ver afectado por la disminución de la resistencia debido a la corrosión.
- Las fuerzas del preesfuerzo inicial, sufren una reducción progresiva en periodos aproximados de 5 años.
- En elementos continuos de concreto preesforzado, se producen mayores pérdidas por fricción debido a un mayor número de curvas y a tendones más largos.[33]

Un componente importante de las estructuras de concreto preesforzado, es el grout de relleno que se coloca dentro de los ductos para recubrir el torón, a continuación se explican las características de los grouts para concreto preesforzado.

### **2.1.3 Grouts para concreto preesforzado**

Los grouts para concreto preesforzado deben cumplir los requerimientos de calidad para llenar completamente los ductos de los tendones de preesfuerzo, y consecuentemente, protegerlos y prevenir su corrosión; además, deben de cumplir los requisitos de resistencia para hacer posible la integración estructural de los miembros de concreto y los tendones a través de la adherencia. El grouteo incompleto puede causar problemas tales como la corrosión de los tendones de preesfuerzo, agrietamiento concentrado e incluso una rápida caída en la resistencia del miembro debido al rompimiento de los tendones. Debido a que el grado de completamiento de grouteo en el concreto preesforzado afecta enormemente el desempeño de las estructuras de concreto preesforzado construidos usando tendones internos, el grouteo debe de ser efectuado de forma completa para no dar lugar a un porcentaje nocivo de aire residual en los ductos [34].

Los grouts seleccionados para concreto preesforzado deben de cumplir los siguientes requisitos de calidad y resistencia:

- El grout debe de tener una fluidez adecuada para llenar completamente la sección transversal del ducto uniformemente.
- No deben de presentar sangrado ni cambios de volumen excesivos.
- No deben de contener sustancias corrosivas en cantidades perjudiciales.
- El grout debe de tener una adherencia adecuada para integrar estructuralmente los miembros de concreto con los tendones [34].

Como estándar de fluidez, el grout debe de tener una fluidez entre los 20 s. y los 30 s. verificados por medio del método de ensayo estándar para el flujo de grouts ASTM C938 [35].

El porcentaje de sangrado obtenido en pruebas de sangrado y expansión de grouts debe de ser de 0.3% o menor, y debe de ser del 0.0% a las 24h. El cambio de volumen o porcentaje de expansión debe de ser entre -0.5% y 0.5% [36].

#### **2.1.4 Proporcionamiento de mezcla de los grouts**

En el diseño del proporcionamiento de mezcla de grouts para concreto preesforzado, los aditivos deben de ser seleccionados considerando las condiciones de la construcción de manera que se logre la calidad deseada. El proporcionamiento de mezcla del grout debe de ser planificado considerando las condiciones ambientales y meteorológicas para los aditivos seleccionados, de modo que la calidad y fluidez especificada sea obtenida, el desempeño de los aditivos y de la mezcla debe de ser verificado con mezclas de prueba. La relación a/c del grout no debe de ser mayor al 45%, el uso de aditivos reductores de agua para mejorar la resistencia y la relación a/c, además de la fluidez puede ser efectivo. En general todos los aditivos químicos utilizados en el proporcionamiento de mezcla de los grouts para concreto preesforzado deben de ser del tipo de no sangrado, el uso de aditivos modificadores de la viscosidad puede beneficiar el control del sangrado en el grout [36].

Como se menciona anteriormente una de las funciones principales de los grouts es la de evitar la corrosión del acero de preesfuerzo, por lo que a continuación se mencionan y describen los diferentes procesos en los que la corrosión se presenta en el acero de preesfuerzo.

### **2.1.5 Corrosión del acero de preesfuerzo.**

La corrosión es la reacción espontánea de un metal o aleación con el medio ambiente que lo rodea, que lleva a su deterioro o destrucción, se le llama espontánea por la tendencia a que ocurra más que por la velocidad en que ocurre. Un tipo especial de corrosión es la corrosión electroquímica, que se presenta cuando los átomos de un metal pierden electrones para convertirse en iones, ocurre mayormente en presencia de un líquido, que pueden ser soluciones acuosas o electrolitos, en este proceso se forma un circuito eléctrico y al sistema se le conoce como celda electroquímica o pila de corrosión. La pila de corrosión está formada por un cátodo, un ánodo y un electrolito, el cátodo es el electrodo donde ocurre el proceso de reducción (ganancia de electrones), mientras el ánodo es el electrodo donde ocurre el proceso de oxidación (pérdida de electrones). La corrosión del acero embebido en concreto se promueve debido a que se forma una pila de corrosión, donde el acero al reaccionar con iones presentes en el concreto u otros que ingresan a este pierde uniformidad, o también pierde su capa pasiva de óxidos que lo protege, lo que genera zonas anódicas y catódicas en el mismo en presencia de un electrolito que es la solución de poro del concreto [37].

La vida útil de las estructuras de concreto se ve afectada por su interacción con el ambiente, éstas pueden sufrir deterioro debido a la corrosión del acero de refuerzo. Las estructuras de concreto preesforzado no son la excepción, éstas se ven expuestas a ambientes urbanos y marinos que son ambientes propicios para que se den los fenómenos de la carbonatación y el ingreso de iones cloruro que promueven la corrosión del acero de preesfuerzo. Como se muestra en la Figura 14 [38], hay diferentes tipos de corrosión presentados en el acero embebido en concreto, estos tipos de corrosión se dan en presencia del  $\text{CO}_2$  y de los iones cloruro, por lo que a continuación se detallan los fenómenos que influyen.

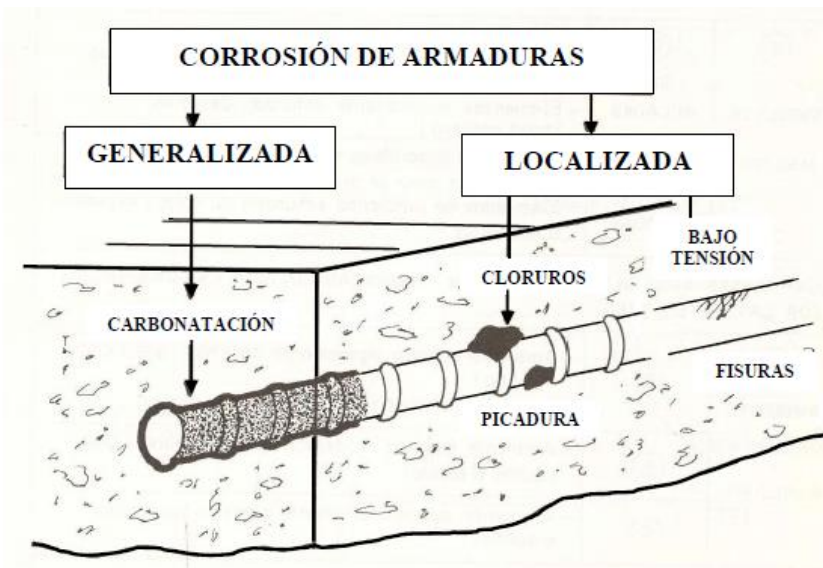


Figura 14 Tipos de corrosión ocurridas en el acero embebido en el concreto

### 2.1.5.1 Carbonatación del concreto

En el caso de la carbonatación, ésta se da debido al ingreso del  $\text{CO}_2$  a través de los poros no saturados del concreto, que se disuelve en la solución de poro y posteriormente reacciona con la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bajando el PH del concreto hasta niveles en los que el acero deja de estar pasivo [9, 39]. La despasivación del acero promovida por la caída del PH en el concreto genera un tipo de corrosión generalizada, debido a que la despasivación se da en toda la superficie del acero, debido a la pérdida de la alcalinidad del concreto que funciona como recubrimiento [40].

### 2.1.5.2 Corrosión por cloruros.

Los iones cloruro, pueden encontrarse dentro del concreto por dos causas: una por que las materias primas del concreto (aditivos, agua, cemento y agregados) los contengan, y otra porque estos iones ingresen al interior del concreto, al tener la estructura situada en una zona de ambiente marino o en la cual se utilicen sales de deshielo [37].

Como se mencionó anteriormente estos iones pueden ingresar dentro del concreto, por difusión, succión capilar, y por permeabilidad. Una vez ingresados, estos se pueden clasificar en tres: los químicamente ligados con los productos de hidratación (reaccionan con el  $\text{C}_3\text{A}$ , formando las sales de Friedel), los físicamente adsorbidos en las paredes de los poros, y los disueltos en la solución de poro del concreto conocidos como cloruros libres, los segundos entran en equilibrio con la solución de poro, quedando

expuestos a pasar a esta. Es la fracción de cloruros libres la que puede llegar al acero y promover su corrosión [41]. La acción de los cloruros en el acero puede generar diferentes tipos de corrosión localizada, los cuales se detallan a continuación.

### **2.1.5.3 Corrosión por picadura**

Las picaduras se producen cuando la capa pasiva de óxidos que recubre al acero es destruida por el ingreso de cloruros a la interfase del acero y el concreto, generando una zona anódica muy pequeña en presencia de una zona catódica muy grande, en la zona catódica se reduce el oxígeno, mientras en la anódica ocurre la disolución del acero. Estas picaduras se mantienen y se profundizan debido a la acción conjunta de varios factores, y debido a que son autocatalíticas, generan las condiciones necesarias para su continuo crecimiento [42]. En el ánodo además, se produce ácido, debido a que los iones cloruro benefician la hidrólisis del hierro en el agua, y así se forman iones  $H^+$  y  $Cl^-$  libre. Esto baja el PH localmente y los iones cloruro permanecen en el medio para seguir promoviendo y agravando el proceso de corrosión [37].

### **2.1.5.4 Corrosión bajo tensión**

Este fenómeno es producto de la acción conjunta de un medio corrosivo y de la deformación del metal debido a tensiones mecánicas de estiramiento residuales (internas), o aplicadas (externas) en el metal. Este tipo de corrosión puede inducir la formación de microgrietas y fisuras muy peligrosas [43]. Este tipo de corrosión ocurre preferencialmente en concreto pre o postensado, donde se utilizan aceros de alta resistencia. La corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico, generalmente asociado a una mala calidad del concreto o al mal relleno de las vainas, también a la presencia de iones agresivos. La presencia de picaduras por corrosión casadas por iones cloruro, puede inducir la corrosión por tensiones, este daño es considerado catastrófico, ya que está asociado a la pérdida de ductilidad y a la fractura de la armadura [37].

Otra problemática que afecta la durabilidad de las estructuras de concreto preesforzado son las contracciones que se originan en el concreto, asimismo en los grouts, por lo cual es importante describir las contracciones y sus tipos.

## **2.2 Contracciones del concreto**

Los cambios volumétricos del concreto aparecen casi inmediatamente después del colado del mismo. Estos cambios volumétricos en el concreto desarrollan esfuerzos de



tensión cuando son restringidos, ocasionando grietas si el esfuerzo de tensión sobrepasa la resistencia a tensión del concreto. Los cambios de volumen tempranos, en las primeras 24 horas, pueden influir en la generación de esfuerzos de tensión y de agrietamientos en el concreto endurecido. Los mecanismos de cambios volumétricos (contracciones) en el concreto se detallan a continuación. :[44, 45]

### **2.2.1 Contracción química**

Esta contracción ocurre debido a la reducción del volumen absoluto de los sólidos y de líquidos en la pasta hidratada. La contracción química permanece a lo largo de la hidratación del cemento. Después del tiempo de fraguado final, la pasta resiste deformaciones, causando la formación de vacíos en la microestructura (la autodesecación).

### **2.2.2 Contracción autógena**

La contracción autógena es el cambio dimensional de la pasta de cemento, mortero, o concreto causado por la contracción química. Cuando la humedad relativa interna es reducida por debajo de cierto nivel (no hay disponibilidad de agua extra), ocurre la auto-desección de la pasta, resultando en una reducción uniforme de volumen.

### **2.2.3 Contracción por temperatura**

Se refiere al cambio volumétrico sufrido por el concreto cuando la temperatura ambiente baja, especialmente con el enfriamiento que se da después del pico máximo de calor de hidratación. Este cambio de temperatura puede llevar a un acortamiento de tal magnitud que puede causar grietas, por lo que se deben instalar apropiadamente juntas de contracción para controlar la localización de las grietas, asimismo como mantener lo más bajo posible, las temperaturas de colocado del concreto.

### **2.2.4 Contracción por secado**

Es la contracción debida a que el agua que no fue consumida por la hidratación de cemento deja el sistema por medio de la evaporación, por lo cual el agua adicional agregada a las mezclas aumenta la probabilidad de contracción por secado, porque habrá más agua disponible para evaporarse.

Como se muestra en los antecedentes de esta investigación, la tecnología del curado interno se ha utilizado para disminuir o eliminar las contracciones en mezclas cementicias, por lo cual sus alcances se detallan a continuación.

## 2.3 Curado interno

El curado en el concreto es uno de los requisitos primordiales para obtener un concreto con la calidad y propiedades solicitadas. Con la aparición de mezclas de concreto de alto comportamiento con relaciones a/c bajas, indicador de una mayor cantidad de materiales cementantes y un bajo contenido de agua. La necesidad de agua de curado en estos concretos aumenta y se vuelve fundamental para obtener las propiedades de resistencia y otras propiedades mecánicas propias de este tipo de concreto. El concreto de alto comportamiento normalmente presenta baja permeabilidad, lo que dificulta el ingreso del agua externa de curado, así, el Curado Interno surge como una solución a esta necesidad de agua extra de curado.

El curado interno consiste en almacenar al interior del concreto, agua que no está disponible durante el mezclado o en las primeras etapas de hidratación del concreto, pero que eventualmente es liberada y suple la necesidad de agua adicional para el curado adecuado del concreto [46]. Según John Ries, miembro del comité C09 de la ASTM el objetivo del curado interno es brindar al concreto otra fuente de agua para conservar la saturación de la pasta cementicia y evitar su autodesecación. Asimismo afirma que el curado interno puede aumentar considerablemente la vida útil y la durabilidad del concreto aumentando la hidratación del cemento, lo que produce una reacción más completa de los cementantes complementarios y reduce la contracción química y por desecación del concreto [47].

La humedad en el concreto se puede perder por varios factores, uno de los principales es la evaporación excesiva en las primeras horas después de haber colado el concreto, dicha evaporación, cuando no es controlada repercute en el concreto dando lugar a pastas con grumos de cementos que no fueron hidratados y que consecuentemente no generaron fases cementantes. Esto afecta directamente a la resistencia del concreto y debido al cambio de volumen, la aparición de fisuras y agrietamientos es promovida, lo que indica un camino libre de los agentes atacantes como el cloruro, sulfato y dióxido de carbono al interior del concreto, y que puede contribuir a la corrosión del refuerzo de acero, lo que conllevará a una disminución drástica de la durabilidad de las estructuras de concreto [48].

El curado interno es utilizado como estrategia para contrarrestar estas pérdidas de humedad en el concreto, y es empleado con el uso de diferentes materiales como ser: Agregados de Peso Ligerero, Fibras, Polímeros súper absorbentes, entre otros. Siendo los más utilizados los agregados ligeros que son presaturados y que han probado su influencia en el aumento de la durabilidad y de la vida útil del concreto de manera práctica y económica [47]. Como se mencionó anteriormente el principio fundamental del curado interno es el de incorporar agua adicional a la mezcla, que no se encuentra inicialmente en el proceso de hidratación, pero que es liberada en etapas posteriores, pero dicha incorporación de agua debe darse de manera homogénea, no es suficiente solo contar con el agua en el interior del concreto, sino que esta debe estar cerca de los granos de materiales cementicios al momento de la hidratación [22].

### **2.3.1 Métodos de curado interno**

Como medios de aplicación del curado interno se pueden mencionar los siguientes:

- Agregados de peso ligero.
- Polímeros superabsorbentes
- Fibras y otros elementos orgánicos de alta absorción.

#### **2.3.1.1 Uso de agregados de peso ligero en sustitución de agregado normal**

En 1991 R. Philleo fue el primero en sugerir el uso de agregado de peso ligero como vehículo del curado interno en el concreto, el agua almacenada iba a reemplazar la consumida por la contracción química durante la hidratación [22]. A partir de esta idea muchos han evaluado el uso de este método, tanto con agregado ligero natural o artificial, con agregado ligero fino y grueso, y con sustitución total o parcial del agregado normal por agregado ligero, comprobando su efectividad como agente de curado interno [46].

Por su estructura porosa, los agregados ligeros pueden presentar absorciones entre el 5% y 25% después de 24 horas de inmersión, lo que permite la incorporación de grandes cantidades de agua para curado interno [49]. Una característica que presentan las mezclas con agregados ligeros en sustitución del agregado normal, es la disminución del Módulo de Elasticidad y de la Resistencia a la Compresión del concreto [50], lo cual puede representar una ventaja o desventaja según la aplicación.

### **2.3.2 Efectos del curado interno en las propiedades del concreto**

Los efectos del curado interno en las propiedades del concreto resultan del aumento del grado de hidratación de los materiales cementicios, lo que se traduce en un aumento de las propiedades mecánicas del concreto, disminución de la permeabilidad y una reducción de las deformaciones a largo plazo debido a la retracción de concreto[46].

#### **2.3.2.1 Efecto en la resistencia a la compresión**

Para mencionar un ejemplo; en el estudio de probetas de concreto ligero de alta resistencia, usando ambas mezclas con una relación  $a/cm = 0.23$ , cemento de alta resistencia temprana, microsílíce y ceniza volante, arena sílica como agregado fino y pizarra expandida como agregado grueso ligero, se evaluó el efecto del curado interno utilizando el agregado grueso ligero en condición saturada, mientras que en la otra se utilizó el agregado ligero secado al aire, la mezcla con curado interno en la edad de 1 día obtuvo una resistencia a la compresión del 1% mayor a la mezcla sin curado, y del 12% mayor en la edad de 365 días, lo que indica una mejora significativa en el caso de 2 mezclas con iguales condiciones pero con la variante del curado interno en una de ellas [51].

#### **2.3.2.2 Efecto en la porosidad**

La porosidad de mezclas de concreto de alta resistencia se ve afectada por el curado interno, debido a que en mezclas con el mismo, se observa una reducción de la porosidad entre 180 y 365 días, y demuestran un mayor grado de hidratación, además se observa una disminución del tamaño promedio de los poros y por consiguiente una menor permeabilidad [52].

#### **2.3.2.3 Efecto en la contracción autógena**

Muchos autores han investigado el efecto del curado interno en la contracción autógena de concretos de alta resistencia, y todos concluyen en que en mezclas con agregado ligero saturado o polímeros superabsorbentes como agentes de curado interno, se presenta una disminución considerable de la contracción autógena en comparación a sus contrapartes sin curado interno[22, 53]. Y en otros casos hasta se consiguió la eliminación total de la contracción autógena [48], dicho efecto es debido a que la fuente de curado interno no permite que la humedad relativa al interior del concreto disminuya, y cuando los poros se empiezan a secar, el agua proveniente de la fuente del curado

interno los mantiene saturados [46]. Múltiples son los beneficios que aporta el uso del curado interno, lo que lo ha convertido en una técnica muy común en la actualidad y para muchas aplicaciones

## **CAPÍTULO III METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

A continuación se describe la metodología experimental aplicada a este proyecto, detallando los materiales utilizados, diseños de mezcla a evaluar, métodos aplicados, pruebas y ensayos realizados, así como el equipo empleado en las mismas.

### **3.1 Materiales**

#### **3.1.1 Cemento**

El cemento utilizado en esta investigación fue del tipo CPO-40 (Cemento Portland Ordinario) según la norma NMX C414, con un bajo contenido de alúmina y sin adiciones de puzolanas en su composición. La Tabla 2 muestra la composición de óxidos encontradas en el cemento por medio de la técnica de Fluorescencia de rayos X, los cuales fueron corregidos con respecto a la pérdida por ignición.

Tabla 2 Composición de óxidos del cemento

<b>Óxidos</b>	<b>CPO-40</b>
Na <sub>2</sub> O	0.412%
MgO	1.127%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.511%
SiO <sub>2</sub>	16.583%
SO <sub>3</sub>	3.772%
K <sub>2</sub> O	0.940%
CaO	66.774%
TiO <sub>2</sub>	0.229%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.486%
P.P.I.	3.27%

Se realizó la caracterización física del cemento por medio de la prueba de densidad (norma ASTM C188 [54]), obteniendo una densidad de 3.09 g/cm<sup>3</sup>.

#### **3.1.2 Agregado fino**

Se utilizó un agregado fino, de tipo calizo triturado, disponible en la zona metropolitana de Monterrey, el cual fue tamizado por la malla #8 para cumplir con ciertos

requisitos de finura. Al mismo se le realizó la prueba de densidad y absorción (norma ASTM C128 [55]) obteniendo una densidad de 2.6 g/cm<sup>3</sup> y una absorción de 2.93%.

La granulometría del agregado fino evaluada según la norma ASTM C136 [56] se muestra en la

Tabla 3, el agregado fino obtuvo un módulo de finura (MF) de 2.89.

Tabla 3 Granulometría del

<b>Tamiz</b>	<b>Retenido</b>	<b>Pasa</b>
#4	0.00%	100.00%
#8	16.67%	83.33%
#16	33.67%	49.67%
#30	8.00%	41.67%
#50	20.50%	21.17%
#100	5.50%	15.67%
Fondo	15.67%	0.00%

agregado fino

### 3.1.3 Agregado ligero

Se utilizó como agregado ligero, una pumicita triturada, disponible en la zona metropolitana de Monterrey, el cual fue tamizado por la malla #8 para cumplir con ciertos requisitos de finura. Al mismo se le realizó la prueba de densidad, absorción y desorción, así como el cálculo del porcentaje de sustitución por agregado fino siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C1761 [57] obteniendo como resultados una densidad de 1.62 g/cm<sup>3</sup>, una absorción de 36.36%, y una desorción de 33.90%, por lo cual la sustitución por agregado fino fue del 13% en volumen.

La granulometría del agregado ligero evaluada según la norma ASTM C136 [56] se muestra en la Tabla 4, el agregado ligero obtuvo un MF de 2.35.

Tabla 4 Granulometría del agregado ligero

<b>Tamiz</b>	<b>Retenido</b>	<b>Pasa</b>
#4	0.00%	100.00%
#8	18.00%	82.00%
#16	21.67%	60.33%
#30	13.33%	47.00%
#50	6.67%	40.33%
#100	5.33%	35.00%
Fondo	35.00%	0.00%



### 3.1.4 Aditivo superfluidificante

Se utilizó un aditivo superfluidificante base policarboxilato, disponible comercialmente, el cual se caracterizó y se obtuvo una densidad de 1.09 g/cm<sup>3</sup> y un porcentaje de sólidos del 43%, para obtener una consistencia fluida en los grouts de laboratorio.

### 3.1.5 Aditivo reductor de la contracción

Un aditivo reductor de la contracción disponible comercialmente base éter alquil polioxialquileo, el cual es un surfactante y se utiliza para reducir la tensión superficial, se utilizó como aditivo modificador de la viscosidad en una solución al 50% de éste con agua destilada para saturar el agregado ligero.

### 3.1.6 Grouts en polvo comerciales

Se utilizaron dos grouts disponibles comercialmente, que consistían de cemento, agregados y aditivos en su constitución. La ficha técnica del primero lo describe como un grout comercial en polvo con agregado mineral sin retracción. El segundo se describe como un producto químico en polvo, libre de cloruros, base cemento portland, agregados minerales, aditivos, y sin retracciones.

### 3.1.7 Acero

El acero utilizado en la investigación es de alta resistencia, utilizado para concreto preesforzado; se utilizaron dos presentaciones del acero, alambres de preesfuerzo de 5 mm de diámetro nominal, y torones de 13 mm de diámetro nominal, consistentes de 7 alambres enrollados. Las características y composición del acero se presentan en las Tabla 5 y Tabla 6. Dicha información fue proporcionada por el proveedor del material.

Tabla 5 Propiedades mecánicas del acero (ASTM A416)

Elongación (%)	Carga de Ruptura (Kg)	Módulo Elástico (Kg/mm <sup>2</sup> )	Carga 1% (Kg)	Peso (Kg)
4.41	18990	19199.2741	16870	2560



Tabla 6 Análisis Químico del acero

C	Mn	Si	P	S	Al	B	Cu	Cr	Ni	Sn	Ti	Mo
0.806	0.602	0.184	0.008	0.009	-	-	0.074	0.043	0.051	0.014	-	0.010

### 3.2 Mezclas de grouts comerciales y de laboratorio

Se realizaron en total 4 mezclas de grouts para esta investigación, dos grouts diseñados y elaborados en laboratorio, y dos disponibles comercialmente. La descripción de las mezclas y sus proporcionamientos se presentan a continuación.

#### 3.2.1 Mezcla de referencia (M1/REF)

La mezcla de referencia consistió de cemento portland CPO-40, agregado fino calizo tamizado por la malla #8, agua y aditivo superfluidificante, con una relación a/c de 0.40. El proporcionamiento de mezcla se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Proporcionamiento de la mezcla de referencia (M1/REF)

Material	Materiales Secos y Agua de Reacción (Kg/m <sup>3</sup> )
Agua	235.00
Cemento	587.50
Agregado Fino	1504.80
Agregado Ligero	0
Aditivo superfl.	3.53

#### 3.2.2 Mezcla con curado interno mejorado (M2/CIV)

La mezcla de curado interno mejorado consistió de cemento portland CPO-40, agregado fino calizo tamizado por la malla #8, agregado ligero tamizado por la malla #8 y saturado en una solución de agua destilada y aditivo reductor de la contracción en una proporción 50:50, agua y aditivo superfluidificante, con una relación a/c de 0.40. El proporcionamiento de mezcla se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8 Proporcionamiento de la mezcla con curado interno mejorado (M2/CIV)

<b>Material</b>	<b>Materiales Secos y Agua de Reacción (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
Agua	235.00
Cemento	587.50
Agregado Fino	1309.18
Agregado Ligero	149.99
Aditivo Superfl.	3.53

### 3.2.3 Mezcla de grout comercial (M3/BAS)

Esta mezcla consistió del grout en polvo y agua en las proporciones indicadas en su ficha técnica para una consistencia fluida. El proporcionamiento de mezcla se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Proporcionamiento de mezcla de grout comercial (M3/BAS)

<b>Material</b>	<b>Materiales Secos y Agua de Reacción (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
Agua	310.00
Grout en polvo	1923.10

### 3.2.4 Mezcla de grout comercial (M4/FES)

Esta mezcla consistió del grout en polvo y agua en las proporciones indicadas en su ficha técnica para una consistencia fluida. El proporcionamiento de mezcla se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 Proporcionamiento de mezcla de grout comercial (M4/FES)

<b>Material</b>	<b>Materiales Secos y Agua de Reacción (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
Agua	370.58
Grout en polvo	1765.00

Los grouts que se emplearon en esta investigación fueron dos elaborados en el laboratorio, y dos disponibles comercialmente. Todos fueron empleados en su consistencia fluida para cumplir con los requisitos de fluidez mencionados anteriormente. Para el mezclado de todos los grouts se utilizó un mismo método basado en las indicaciones de mezclado de la norma ASTM C938 [58], con la siguiente modificación de tiempos.

### **3.2.4.1 Preparación y mezclado**

Para el mezclado de los grouts, en el caso de los elaborados en laboratorio, se calculaba la humedad de obra en el agregado fino, para realizar la corrección del agua en el proporcionamiento de los grouts. En el caso del agregado ligero, éste se mantuvo siempre en una condición saturada superficialmente seca (SSS), debido a que se encontraba saturado con una solución de agua y aditivo reductor de la contracción, por lo cual calcular su humedad de obra no era necesario.

A todos los grouts se les mezcló utilizando una batidora eléctrica planetaria, siguiendo el siguiente método:

1. Agregar el agua de mezclado, junto con el aditivo superfluidificante.
2. Agregar el o los agregados.
3. Verter el cemento.
4. Mezclar durante dos minutos y 45 segundos a velocidad media.
5. Detener y raspar el grout de las paredes del recipiente de la mezcladora durante 15 segundos.
6. Mezclar a velocidad media durante un minuto más.

En el caso de los grouts comerciales, al ser solo material en polvo, solo se agregó el agua de mezclado, y posteriormente el grout en polvo, siguiendo los mismos tiempos de mezclado.

## **3.3 Métodos y Ensayos**

### **3.3.1 Ensayos y técnicas de caracterización**

Los siguientes métodos, ensayos y técnicas se emplearon para determinar las características y propiedades físico-químicas de los materiales y mezclas evaluadas en esta investigación.

#### **3.3.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)**

Esta técnica de caracterización fue empleada para determinar la composición química en forma de óxidos de los materiales a utilizar en la investigación. En la 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, por medio de lo cual se calcula en porcentaje los óxidos presentes en la muestra. El equipo utilizado en esta técnica fue uno del modelo Epsilon 3 de PANalytical.

### **3.3.1.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)**

Esta técnica fue utilizada para conocer características morfológicas de los materiales. Un haz de electrones incide sobre el material generando electrones secundarios y electrones retro dispersados. La señal generada por la interacción de los electrones que inciden sobre la muestra es detectada y transformada a una señal electrónica que se proyecta en un tubo de rayos catódicos, lo que da como resultado en la visualización de una imagen. El equipo utilizado fue un microscópico electrónico modelo JSM-6490LV de JEOL.

### **3.3.1.3 Difracción de rayos X (DRX)**

La difracción de rayos X se empleó para determinar las fases y compuestos cristalinos de los materiales evaluados. En esta técnica un haz de rayos X monocromático incide sobre la muestra y los rayos X difractados por los cristales de la muestra son detectados, el ángulo de difracción es característico de cada fase cristalina. En esta técnica se utilizó un equipo Bruker D8 advance con detector Vantec.

### **3.3.1.4 Distribución de tamaño de partículas**

Esta técnica se empleó para conocer el tamaño máximo y promedio de las partículas y la distribución de éstas, de los materiales en polvo. 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.

### **3.3.1.6 Densidad y absorción**

Para determinar la densidad del cemento se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C188 [54], mientras que para la obtención de la densidad y absorción del agregado fino se empleó la norma ASTM C128 [55], mientras que para las mismas características del agregado ligero se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C1761 [57].

### 3.3.2 Ensayos y pruebas físicas y mecánicas

A continuación se describen las pruebas y ensayos realizados a las diferentes mezclas, para evaluar sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales se desarrollaron en estado fresco y endurecido.

#### 3.3.2.1 Pruebas en estado fresco

##### 3.3.2.1.1 Masa unitaria y contenido de aire

Se evaluaron las 4 mezclas siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C185 [59], para determinar su masa unitaria y el contenido de aire, obteniendo el último por diferencia entre el peso volumétrico teórico y el real obtenido en el ensaye. A las mezclas de grouts comerciales (M3 y M4) no se les pudo calcular el contenido de aire, ya que se desconocían las densidades reales de los constituyentes del grout en polvo, que contenía mezclados el cementante con los agregados y los aditivos. La Figura 15 muestra de manera gráfica la determinación de la masa unitaria.



Figura 15 Llenado del recipiente de volumen y peso conocido para la determinación de la masa unitaria de la mezcla.

### 3.3.2.1.2 Fluidéz

La fluidéz y extensibilidad de los grouts se evaluaron con los lineamientos dictados por la norma ASTM C230 [60], utilizando la mesa de fluidéz, con la salvedad de que se usó una placa más grande por la extensibilidad alcanzada por las mezclas (Ver Figura 16). Debido a la fluidéz de las mezclas, el compactado en el cono truncado y los golpes a la mesa no fueron necesarios. Una de las mezclas (M4) debido a su alta fluidéz no pudo ser evaluada con la mesa de fluidéz, por lo que se optó a medir su fluidéz por medio del cono de flujo y siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C939 [61] (Ver Figura 17).



Figura 16 Extensibilidad de las mezclas (ASTM C230)



Figura 17 Fluidéz de la mezcla M4 (ASTM C939)

### 3.3.2.1.3 Tiempo de fraguado

La obtención del tiempo de fraguado fue necesaria para considerarlo en la prueba de contracción autógena, por lo que se evaluaron las mezclas siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C953 [62], y se utilizó un aparato automático de penetración modelo Vicatronic de Humboldt proveído por el NIST (Ver Figura 18).

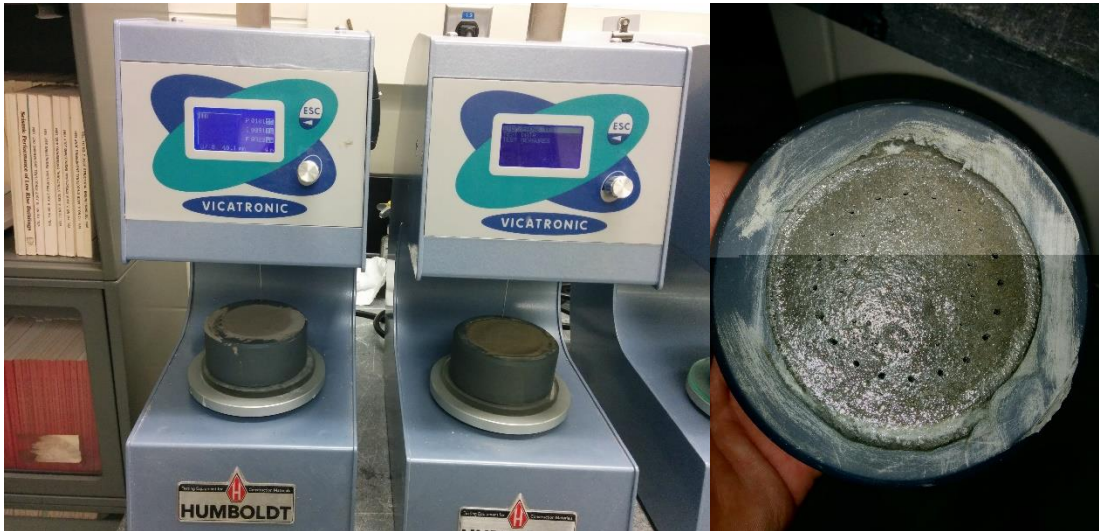


Figura 18 Medición del tiempo de fraguado por medio de un aparato automático y las penetraciones realizadas por el mismo.

### 3.3.2.1.4 Calorimetría isotérmica

Las pruebas de calorimetría isotérmica se realizaron con el fin de conocer el desarrollo de calor debido a las reacciones generadas en la hidratación del cemento en las diferentes mezclas, para realizar la prueba, primero se obtuvieron las capacidades caloríficas de los materiales constituyentes de las mezclas. Esto se realizó a través de un equipo analizador de constantes térmicas Hot Disk proveído por el NIST, utilizando un sensor Kapton 5501. La muestra de polvo de más o menos un gramo se colocó en un recipiente de oro con tapa, que estaba conectado al sensor, y este a su vez era aislado por medio de dos tapas de poliestireno (Ver Figura 19) [63].

A las muestras de polvo se les realizaron 4 mediciones a cada hora para promediar su capacidad calorífica, los resultados de todos los materiales constituyentes de las mezclas se utilizaron para que con la proporción en la que estaban presentes en la mezcla igualaran la capacidad calorífica de 11.5 gramos de cemento estándar (Ver Figura 20) que se utilizaría como muestra de referencia en las pruebas de calorimetría, obteniendo así la cantidad de muestra de mezcla que se utilizaría en la prueba.

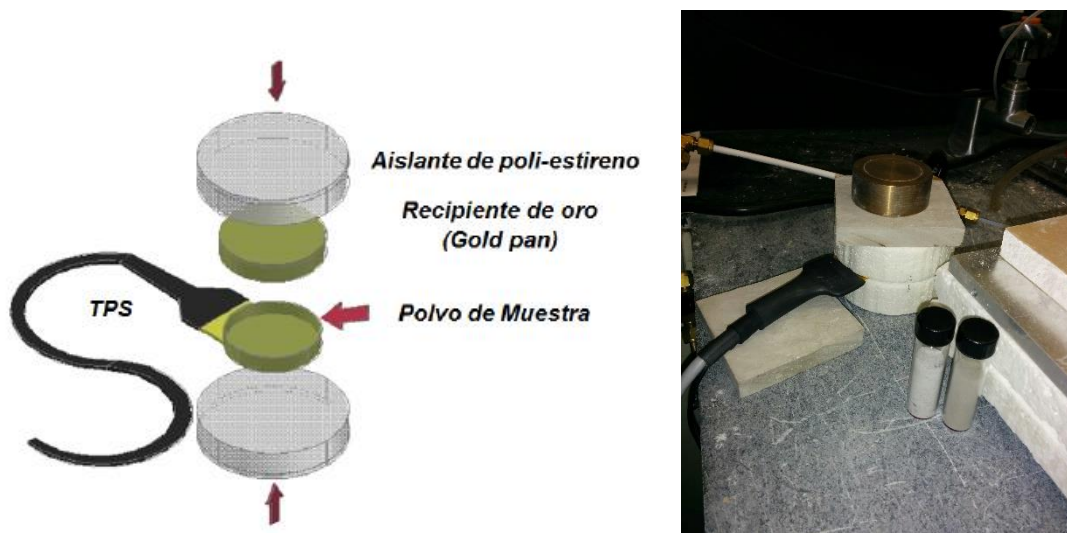


Figura 19 Diagrama de la configuración de la prueba y equipo utilizado para la medición de capacidad calorífica



Figura 20 Muestra de 11.5 g de cemento de referencia

La prueba de calorimetría consistió en colocar las muestras de las mezclas en unas cápsulas de vidrio selladas (Ver Figura 21), que fueron a su vez colocadas dentro de un calorímetro de 8 celdas que las mantuvo en condiciones isotérmicas, en este caso a una temperatura de 23 °C. Las cápsulas se encuentran en contacto con un sensor de flujo de calor, que a su vez está en contacto con un disipador de calor. Cuando el calor es producido o consumido por cualquier proceso, se desarrolla un gradiente de temperatura a través del sensor, lo cual genera un voltaje que es medido, este voltaje es proporcional al flujo de calor a través del sensor, y esta señal es registrada continuamente en tiempo real.



Las mezclas fueron evaluadas durante siete días con el objetivo de registrar el calor liberado en las primeras 24 horas de hidratación, y el calor acumulado durante los siete días. El equipo utilizado fue un calorímetro TAM Air de Thermometric proveído por el NIST (Ver Figura 22).



Figura 21 Colocación de las muestras en las cápsulas y sellado de las mismas

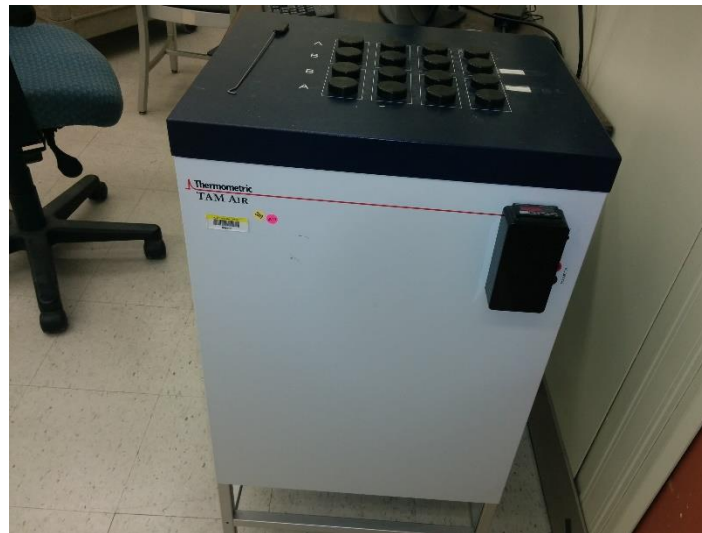


Figura 22 Calorímetro utilizado

### 3.3.2.2 Pruebas en estado endurecido

#### 3.3.2.2.1 Resistencia a compresión

Las cuatro mezclas fueron evaluadas para determinar su resistencia a compresión, se elaboraron cubos de 50 mm de lado (Ver Figura 23), siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C109 [64], con las modificaciones para los grouts mencionadas en la norma ASTM C942 [65].

Los cubos de las cuatro mezclas se curaron en tres diferentes ambientes de curado, el primero consistió en un curado sumergido en una solución de agua saturada con cal, para evitar la lixiviación de álcalis; el segundo consistió en un curado sumergido en una solución salina con el 3% de Cloruro de Sodio, para simular un ambiente marino; por último, el tercer ambiente de curado era un ambiente sellado, los cubos se colocaron en doble bolsa de plástico para simular el tipo de curado que se daría a un grout dentro de una vaina de preesfuerzo. Los especímenes se ensayaron a 3 edades: 7, 28, 90 días. (Ver Figura 24)

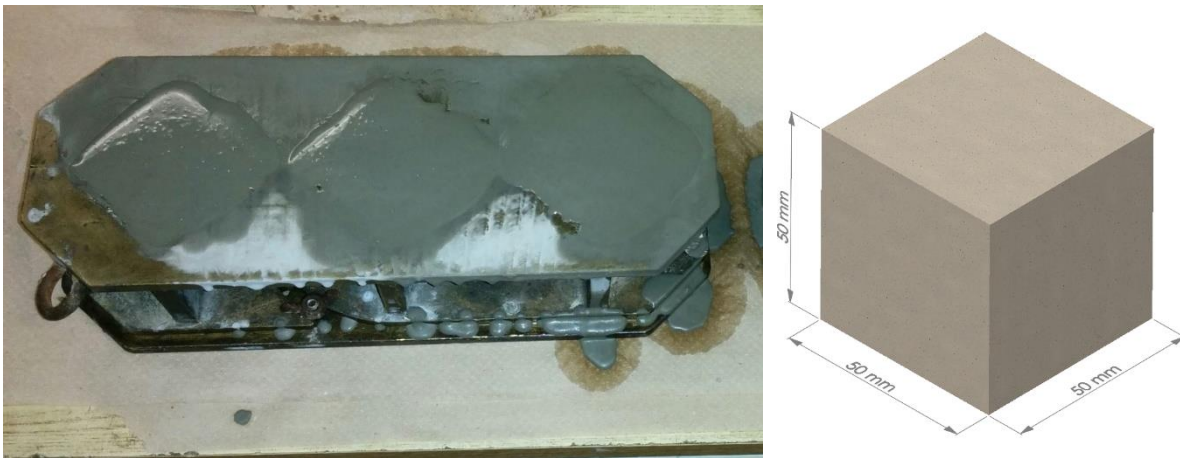


Figura 23 Elaboración y diagrama de cubos para resistencia a compresión



Figura 24 Ensayo a compresión de cubos

### 3.3.2.2 Esfuerzo de adherencia

Se elaboraron especímenes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura, con un torón de acero de preesfuerzo de 13 mm de diámetro embebido en la mezcla (Ver Figura 25). Para su elaboración, ensaye y cálculo del esfuerzo se siguió la metodología de Musa et. al [66]. Los especímenes se curaron en un cuarto con una humedad relativa alta hasta la edad de 28 días en la que fueron ensayados (Ver Figura 26). El cálculo del esfuerzo de adherencia se realizó de la siguiente manera:

$$\sigma_b = \frac{P}{\pi dl} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_b$  Es el esfuerzo de adherencia en MPa.

$d$  Es el diámetro nominal del torón en mm.

$P$  Es la carga a tensión máxima alcanzada en N.

$l$  Es la longitud del torón embebida en el grout en mm.

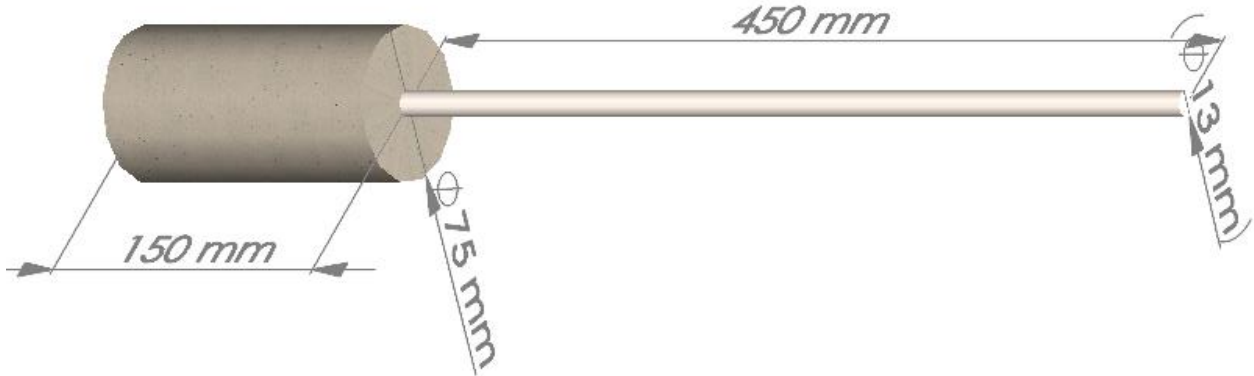


Figura 25 Diagrama de los especímenes con torón embebido para el ensaye de adherencia.



Figura 26 Elaboración, curado y ensayo de los especímenes de adherencia.

### 3.3.2.2.3 Contracción autógena

Se midió la contracción autógena de las cuatro mezclas siguiendo los lineamientos del método de prueba de la norma ASTM C1698 [67], las mediciones se realizaron durante 28 días, comenzando desde el tiempo de fraguado final de las mezclas, se elaboraron especímenes llenando tubos corrugados (Ver Figura 27) y se midieron utilizando un extensómetro (Ver Figura 28).



Figura 27 Tubos corrugados para medición de contracción autógena.



Figura 28 Extensómetro utilizado para la medición de los tubos corrugados.

### 3.3.2.3 Pruebas de durabilidad

#### 3.3.2.3.1 Medición de potencial y velocidad de corrosión

Las cuatro mezclas fueron evaluadas como recubrimiento de protección del acero ante la corrosión, se elaboraron especímenes prismáticos (Ver Figura 29) para medir el potencial y velocidad de corrosión del acero embebido en los grouts; los especímenes se sumergieron en una solución de agua y cloruro de sodio al 3% para simular un ambiente sumergido en agua de mar, y que el transporte de los iones cloruro se diera por medio de la difusión.

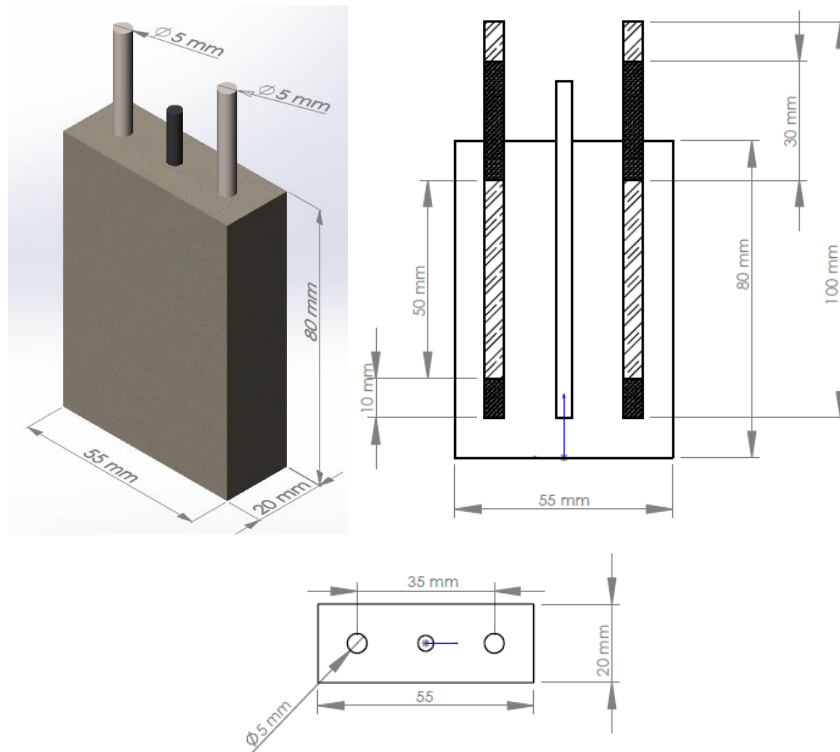


Figura 29 Esquema y dimensiones de los prismas utilizados para la medición de  $E_{corr}$  e  $I_{corr}$  del acero embebido en los grouts

Las medidas de potencial ( $E_{corr}$ ) y velocidad ( $I_{corr}$ ) de corrosión se realizaron empleando la técnica no destructiva de la resistencia a la polarización (RP) en la que por medio de un potenciostato se aplica un potencial al acero, y por medio de su resistencia a cambiar su potencial de equilibrio se determina un potencial y una velocidad de corrosión producido en el acero.

El potencial de corrosión brinda una información cuantitativa de la probabilidad de que el acero esté sufriendo corrosión (Ver Tabla 11) [68], mientras la velocidad de corrosión muestra de forma real la velocidad en que los procesos de corrosión se están dando en el acero por medio de la corriente generada en el mismo (Ver Tabla 12).

Tabla 11 Criterios para evaluar  $E_{corr}$  en el acero embebido en concreto

$E_{corr}$ vs Calomel (mV)	Probabilidad de Corrosión
> -80	10% a que se presente
-80 a -230	Zona incierta
< -230	90% a que se presente
< -380	Corrosión severa

Tabla 12 Nivel de corrosión según  $I_{corr}$

$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 a 0.5	Bajo
0.5 a 1.0	Moderado
>1.0	Alto

Las mediciones de  $E_{corr}$  e  $I_{corr}$ , se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C876 [69], y se utilizó un equipo de potenciostato Interface1000 de Gamry, utilizando un electrodo de referencia de calomel (Ver Figura 30).



Figura 30 Equipo y arreglo utilizado para la medición de  $E_{corr}$  e  $I_{corr}$

### 3.3.2.3.2 Medición de resistividad eléctrica superficial

La resistividad eléctrica del concreto es una medida de la capacidad del concreto de resistir la transferencia de electrones, esta propiedad eléctrica (propiedad de transporte iónico) del concreto es ahora un indicador para la evaluación de propiedades físicas de la estructura porosa, microestructura y la química de la solución de poro.

Para la medición superficial de la resistividad eléctrica de los grouts, se elaboraron especímenes cilíndricos (Ver Figura 31), que se curaron en un cuarto con humedad relativa alta inmediatamente después de ser desmoldados (a 24 horas del colado), y durante se realizaron las mediciones hasta que las mismas dejaran de variar en un 1%. La medición de la resistividad superficial se realizó según los lineamientos de la norma AASHTO TP95 [70]. El equipo utilizado fue un aparato con el arreglo de Wenner de 4 puntas modelo Resipod de Proceq (Ver Figura 32).

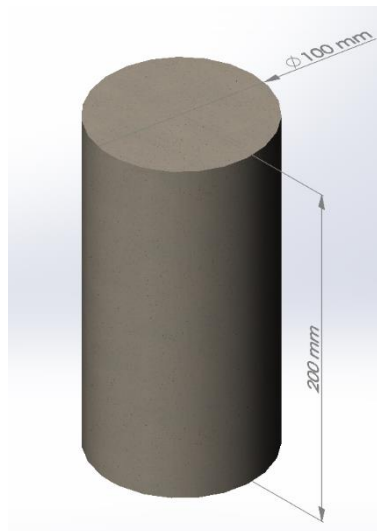


Figura 31 Diagrama de los cilindros y marcado de los mismos para su medición.



Figura 32 Equipo utilizado para la medición de la resistividad

### 3.3.2.3.2 Permeabilidad rápida a los iones cloruro.

La permeabilidad a los iones cloruro es un indicador de durabilidad de las mezclas cementicias, sus valores indican características de calidad de las mezclas, e infieren su habilidad como protector del acero ante la corrosión. Para esta prueba se utilizaron los mismos especímenes cilíndricos utilizados en la prueba de resistividad eléctrica superficial, éstos fueron cortados para obtener de ellos unas pastillas de 10 cm de diámetro y de 5 cm de espesor, las mismas fueron pintadas con pintura epóxica en su perímetro, dejando las caras inferior y superior expuestas, luego fueron puestas a vacío

para eliminar de ellas la mayor cantidad de aire, y posteriormente fueron saturadas en agua en la bomba de vacío (Ver Figura 33).



Figura 33 Preparación de los especímenes para la prueba de permeabilidad rápida a los iones cloruro.

Para el arreglo de la prueba (Ver Figura 34) se siguieron los lineamientos de la norma ASTM C1202 [71], la cual consiste en dejar pasar un voltaje de 60V durante 6 horas, por medio de unas celdas con soluciones de hidróxido de sodio, y cloruro de sodio en sus extremos, mismas que estaban en contacto con la pastilla de la mezcla. Los resultados al final muestran una carga pasada en Coulombs que indican un parámetro de calidad de la mezcla en cuanto a durabilidad.



Figura 34 Arreglo de las celdas para el ensayo de permeabilidad rápida a los iones cloruro.



# CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4.1 Ensayos y técnicas de caracterización inicial

### 4.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se determinó la composición química en forma de óxidos de los materiales en polvo utilizados en la investigación, el cemento y los grouts comerciales. En el caso del cemento los valores fueron corregidos con respecto a la pérdida por ignición evaluada en el mismo, a los grouts comerciales no se les realizó la pérdida por ignición debido a que en su constitución llevan incluidos agregados y otros materiales que no son cemento reactivo. Los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Composición de óxidos del cemento y los grouts comerciales.

Óxidos	CPO-40	BAS	FES
Na <sub>2</sub> O	0.412%	14.858%	0.633%
MgO	1.127%	0.050%	0.749%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.511%	0.708%	4.063%
SiO <sub>2</sub>	16.583%	7.508%	21.813%
SO <sub>3</sub>	3.772%	1.548%	4.554%
K <sub>2</sub> O	0.940%	0.844%	0.998%
CaO	66.774%	69.253%	64.064%
TiO <sub>2</sub>	0.229%	0.354%	0.255%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.486%	4.877%	2.870%
P.P.I.	3.27%	-	-

Los resultados muestran que los contenidos de CaO y SiO<sub>3</sub> varían en los diferentes materiales significativamente, debido principalmente a la presencia de agregados y otros materiales en los grouts comerciales, el CPO-40 muestra porcentajes normales de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ya que para este tipo de cemento se espera un máximo del 6% [72], con esto se evita la formación de etringita que se produce con la reacción de los sulfatos y la fase del aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) [73] del cemento. Por otro lado, es esta fase la que liga químicamente a los cloruros libres para formar las sales de friedel [41, 74], por lo que una baja proporción de esta fase, debida a la poca presencia de alúmina, podría promover una mayor cantidad de cloruros libres en la matriz cementante.

Los grouts comerciales en cambio, presentan una composición diferente al CPO-40, en especial el BAS, que obtuvo un contenido muy bajo de alúmina y un muy alto contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$ , este alto contenido de álcalis, podría promover la reacción álcali agregado, si el agregado del grout fuera reactivo, por estas características se supone que su componente reactivo no es un cemento portland ordinario, el FES en cambio, si muestra contenidos de óxidos similares al CPO-40, con la única diferencia en el contenido de  $\text{SiO}_2$  (mayor al del CPO-40) debido quizás a que el agregado del grout es arena sílica.

#### 4.1.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Como se muestra en las Figura 35, Figura 36 y Figura 37, los granos del polvo reactivo (cemento) del CPO-40 y los grouts comerciales tienen una morfología angular, este tipo de morfología es característica de la fase del  $\text{C}_3\text{S}$  (Alita) de los cementos portland, en el caso del grout comercial BAS (Ver Figura 36), se puede observar una morfología esférica en una partícula, por lo que se supuso que podría ser una partícula de ceniza volante, pero por medio de EDS se realizó el análisis químico (Ver Figura 38) y se encontró un alto contenido de Carbono, por lo que podría ser alguna impureza u otro material orgánico encontrado en la muestra.

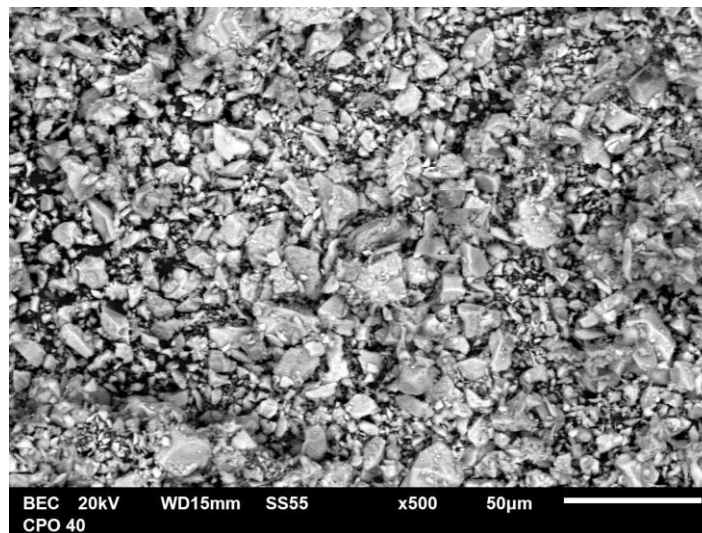


Figura 35 Micrografía de la morfología de los granos del cemento CPO-40

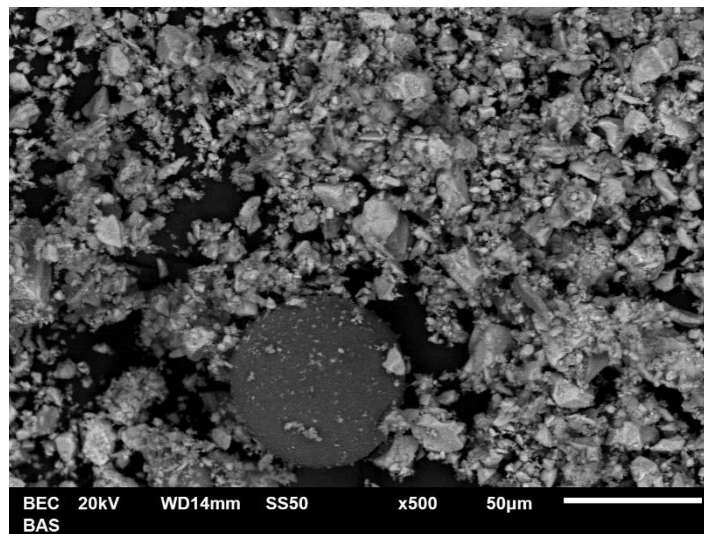


Figura 36 Morfología encontrada en el grout comercial BAS

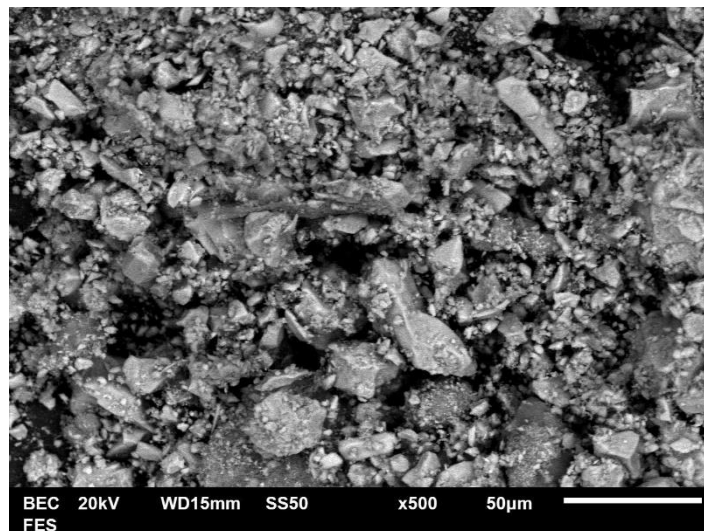


Figura 37 Morfología de los granos de cemento y agregados del grout comercial FES

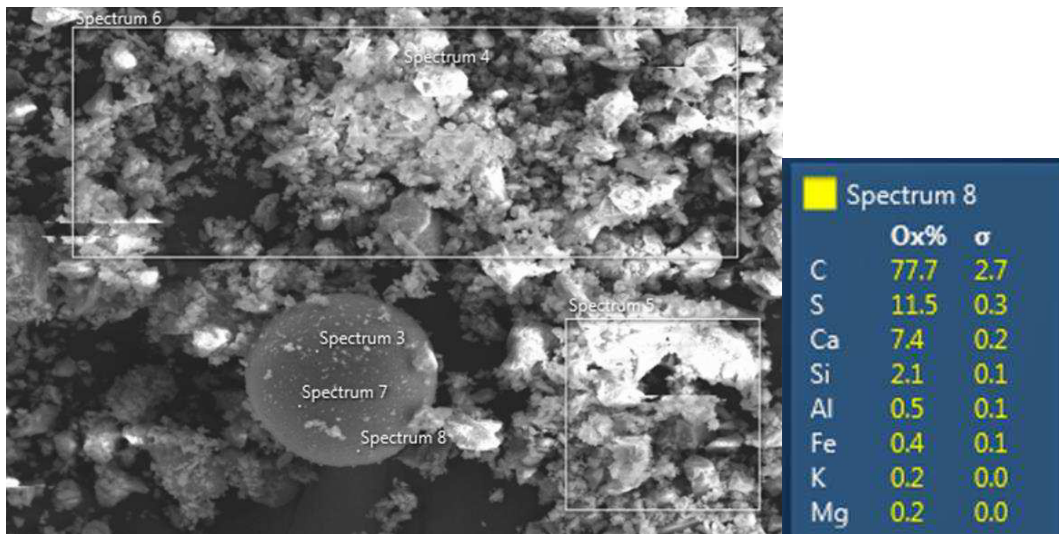


Figura 38 Análisis químico elemental realizado por medio de EDS a la partícula esférica del grout BAS

La Figura 39 muestra una micrografía realizada en un grano del agregado del grout BAS, a la misma se le realizó EDS y se confirma que el agregado encontrado en el grout es arena sílica, al igual que en el grout FES, como se muestra en la Figura 40 el agregado obtuvo una composición elemental en la que predomina el silicio.

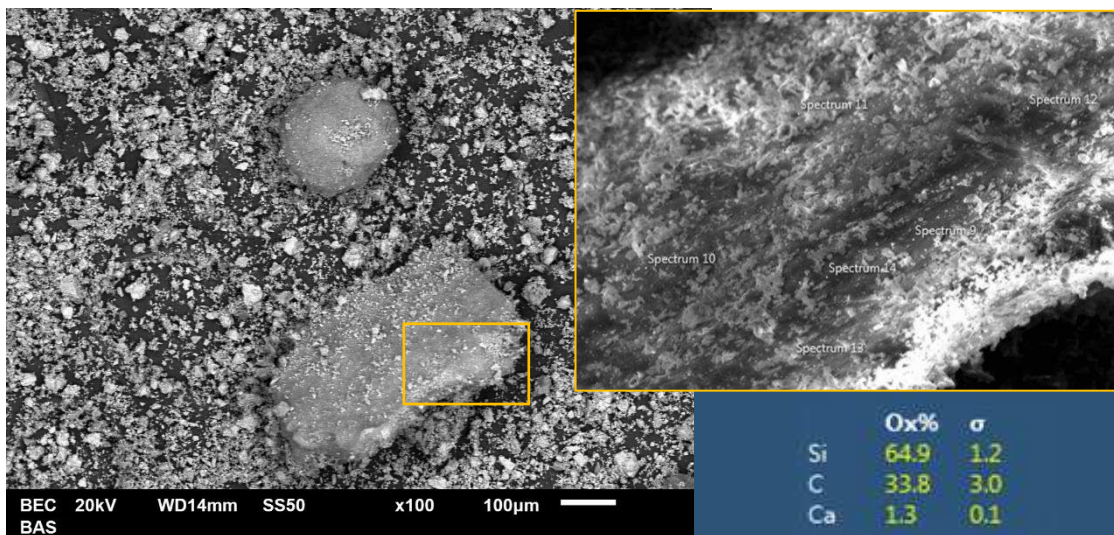


Figura 39 Micrografía y EDS del agregado del grout BAS

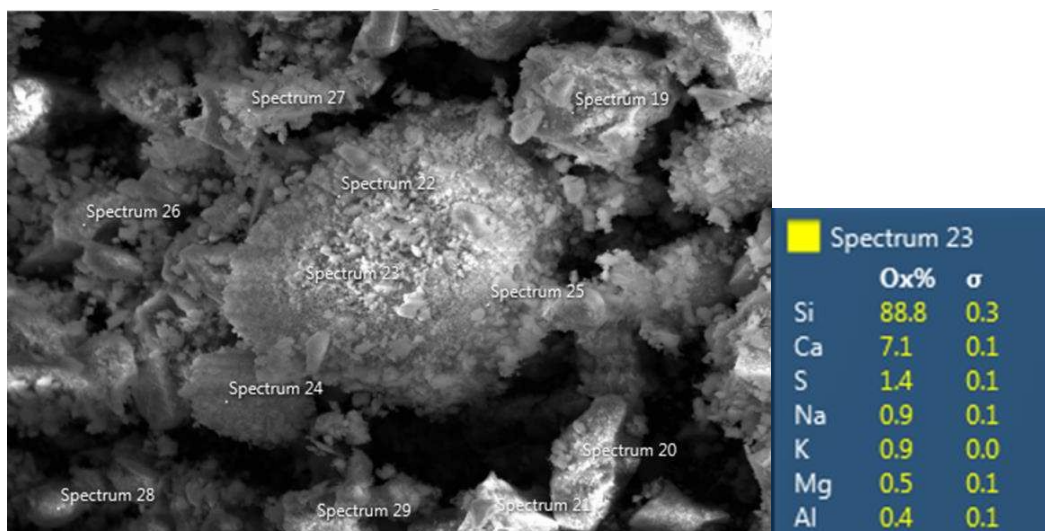


Figura 40 Micrografía y EDS del agregado del grout FES

### 4.1.3 Difracción de rayos X (DRX)

Las Figura 41, Figura 42 y Figura 43, muestran los difractogramas obtenidos en la caracterización de los materiales en polvo de la investigación. La Figura 41 es el difractograma del cemento CPO-40, en éste se presentan las fases usuales encontradas en cementos portland, la alita o silicato tricálcico ( $C_3S$ ), la belita o silicato dicálcico ( $C_2S$ ), y el ferroatuminato tetracálcico ( $C_4AF$ ).

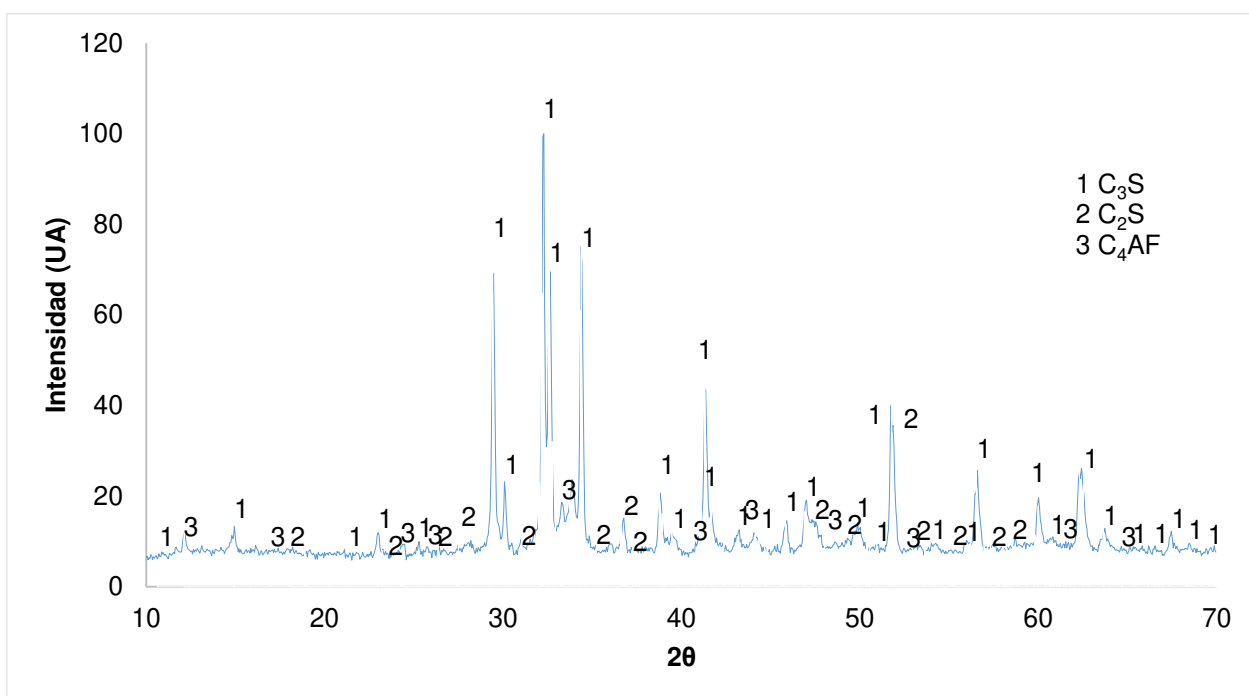


Figura 41 Difractograma del cemento CPO-40

La Figura 42 muestra el difractograma del grout comercial BAS, al igual que en el cemento portland, dos fases características de este material se encuentran este grout, el  $C_3S$  y el  $C_2S$ , otra característica particular es la presencia de óxido de silicio en forma de cuarzo, que se puede deber a la presencia de arena sílica en el grout. Por último, se encontró una fase de silicato de sodio hidratado que puede ser un aditivo agregado al grout que fue deshidratado, sin embargo, este compuesto pudo haber contenido agua ligada.

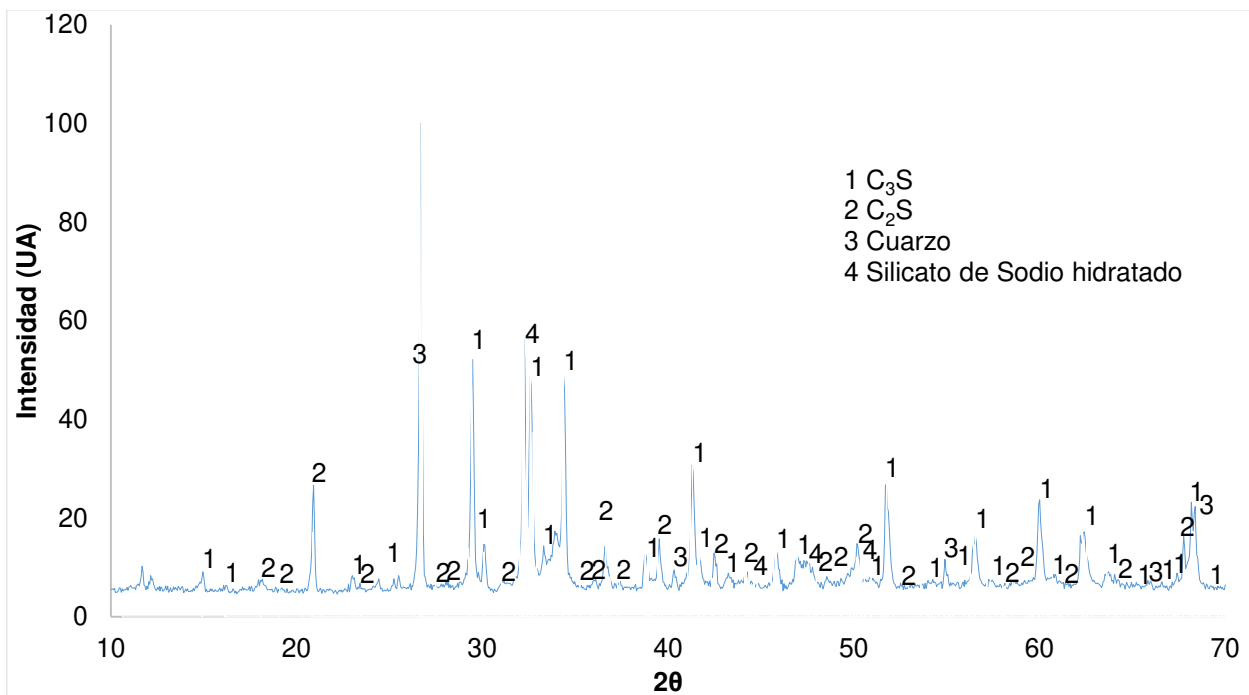


Figura 42 Difractograma del grout comercial BAS

Por último, la Figura 43 muestra el difractograma del grout comercial FES, en éste al igual que el BAS y el CPO-40 se presentan las fases características de los cementos portland que son el  $C_3S$  y el  $C_2S$ , y al igual que el grout comercial BAS, éste presentó una fase de óxido de silicio en forma de cuarzo, que se puede deber principalmente por la presencia de arena sílica en el grout.

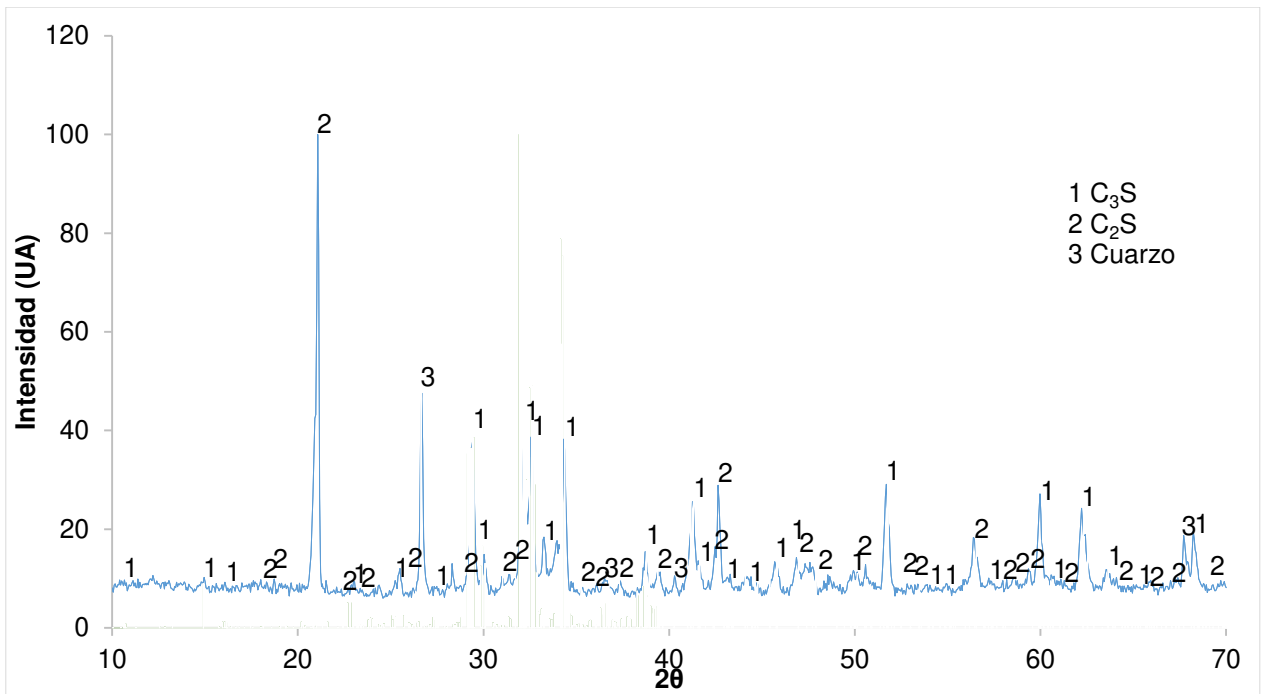


Figura 43 Difractograma del grout comercial FES

#### 4.1.4 Distribución de tamaño de partículas

La Figura 44 muestra la distribución de tamaño de partículas del cemento CPO-40 y de los grouts comerciales, la misma se distribuye desde el tamaño de partícula de 0.344  $\mu\text{m}$  hasta los 1408  $\mu\text{m}$ .

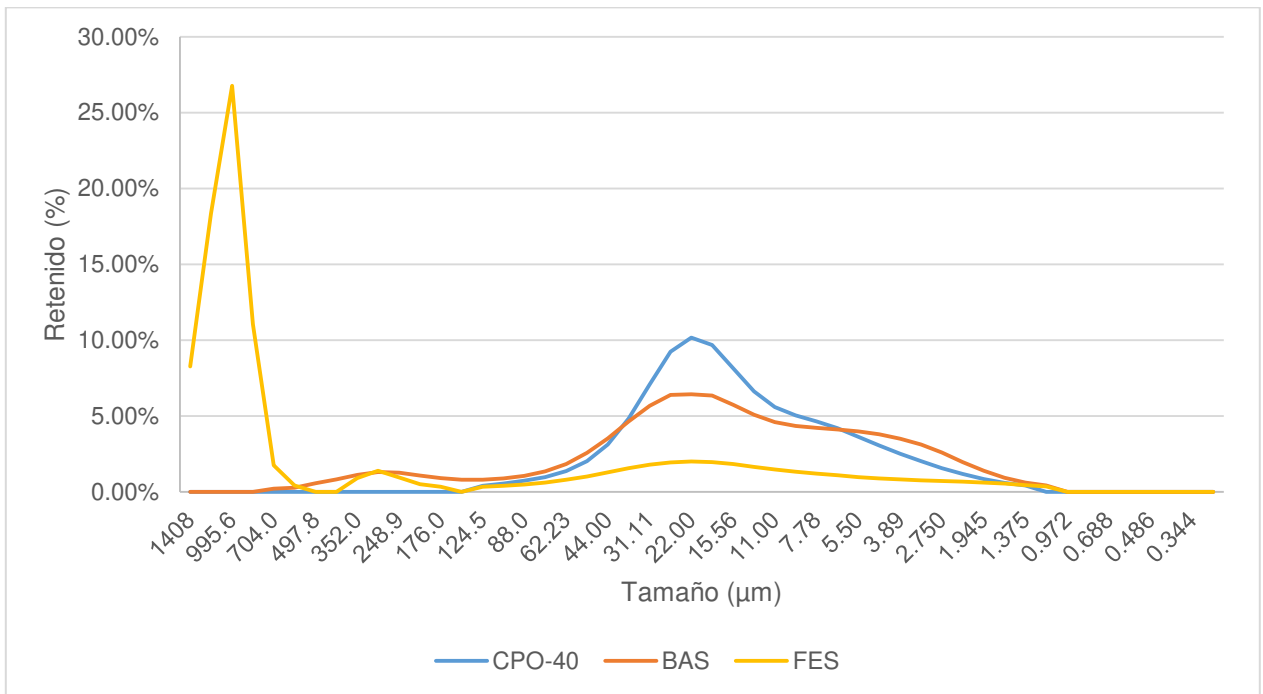


Figura 44 Distribución de tamaño de partículas del cemento y los grouts comerciales

Como se observa en los resultados, el cemento CPO-40 obtuvo un tamaño promedio de partícula de 22  $\mu\text{m}$  (el tamaño promedio de partícula en los cementos portland es entre los 10 y los 20  $\mu\text{m}$  [75]), un tamaño mínimo de partícula de 1.375  $\mu\text{m}$  y un máximo de 124.5  $\mu\text{m}$ . El grout BAS al igual que el cemento obtuvo un tamaño promedio de 22  $\mu\text{m}$ , y un tamaño mínimo y máximo de partícula de 1.156  $\mu\text{m}$  y 704  $\mu\text{m}$  respectivamente, el tamaño máximo más grande se debe a la presencia del agregado en el grout, aunque se puede inferir que también está constituido con polvos más finos que en el CPO-40.

El grout FES en cambio, muestra que tiene una porción mayoritaria de partículas gruesas, ya que el tamaño promedio de las partículas es de 996  $\mu\text{m}$ , el tamaño máximo y mínimo de partícula en este grout es de 1408  $\mu\text{m}$  y 1.156  $\mu\text{m}$  respectivamente. En los resultados del grout FES se pudo observar que no existían partículas de algunos tamaños en la parte gruesa del material, por lo que se puede inferir que en la granulometría del agregado del mismo no había una adecuada distribución.

## 4.2 Ensayos y pruebas físicas y mecánicas

### 4.2.1 Pruebas en estado fresco

#### 4.2.1.1 Masa unitaria y contenido de aire

La Tabla 14 muestra los resultados de masa unitaria y contenido de aire de las cuatro mezclas, la mezcla M1/REF obtuvo una masa unitaria mayor con respecto a la mezcla M2/CIV, debido a que en sus constituyentes solo agregado fino de peso normal está presente, la porción de agregado ligero presente en sustitución parcial del agregado normal en la mezcla M2/CIV al tener una densidad menor que el agregado fino de peso normal influye en que la masa unitaria de esta mezcla sea menor.

Tabla 14 Masa unitaria y contenido de aire de las diferentes mezclas

Mezcla	Masa Unitaria (Kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Aire
M1/REF	2322.08	4.27%
M2/CIV	2177.17	11.36%
M3/BAS	1778.41	-
M4/FES	2111.17	-

De los resultados de los grouts comerciales se puede inferir que el agregado presente en la mezcla M3/BAS tiene una menor densidad que el de la mezcla M4/FES



ya que obtuvo una masa unitaria menor, como se observó en los resultados de distribución de tamaño de partículas, el grout BAS tenía polvos más finos, por lo que se supone que dichos polvos tienen una densidad más baja que la de los presentes en la mezcla del grout FES.

De los datos obtenidos del contenido de aire se puede suponer que la presencia del agregado ligero poroso en la mezcla M2/CIV influye aumentando el contenido de aire de la mezcla con respecto a la de referencia, probablemente se deba a que en la porosidad del agregado ligero se atrape más aire. En las mezclas de los grouts comerciales, como se mencionó anteriormente, no se pudo obtener el contenido de aire al no conocer las densidades de los constituyentes del grout en polvo, para obtener una masa unitaria teórica.

#### 4.2.1.2 Fluidez

La

Tabla 15 muestra los resultados obtenidos mediante las pruebas de extensibilidad en la mesa de fluidez y el tiempo de flujo en el cono de flujo de las cuatro mezclas, de los resultados se puede comentar que la mezcla más fluida fue la M4/FES que fue la única que se pudo evaluar mediante el cono de flujo, al cumplir un tiempo de flujo de 30 segundos, esto se debe al mayor contenido de agua utilizada en la mezcla (Ver Tabla 10). La mezcla M2/CIV obtuvo una extensibilidad ligeramente mayor que la mezcla M1/REF, debido quizás al mayor contenido de aire encontrado en la mezcla, el contenido de aire atrapado está directamente relacionado con la fluidez de las mezclas [76].

Tabla 15 Extensibilidad y Fluidez de los grouts

Mezcla	Extensibilidad (cm) /*Fluidez (seg)
M1/REF	31 ±1
M2/CIV	32 ±1
M3/BAS	28 ±1
M4/FES	*30.00

#### 4.2.1.3 Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado inicial y final se calculó mediante el registro de la profundidad de penetración de la aguja de Vicat en la muestra del grout, con respecto al

tiempo, el tiempo de fraguado inicial estaba dictado por el tiempo en el que la aguja penetrara hasta una profundidad de 25 mm, mientras que el tiempo de fraguado final se definía como el tiempo en el que la agua dejara de imprimir una huella visible en la superficie de la muestra del grout. Mediante el registro de las penetraciones con respecto al tiempo se realizó una interpolación para determinar el tiempo en el que la penetración había alcanzado una profundidad de 25 mm. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16 Tiempos de fraguado inicial y final de los grouts

<b>Mezcla</b>	<b>Tiempo de fraguado inicial (min)</b>	<b>Tiempo de fraguado final (min)</b>
M1/REF	227	450
M2/CIV	229	381
M3/BAS	371	440
M4/FES	300	360

Como se observa en los resultados la presencia del agregado ligero saturado no afecta el tiempo de fraguado inicial en la mezcla M2/CIV, ya que obtuvo un tiempo muy similar al de la mezcla M1/REF, sin embargo el tiempo de fraguado final si se ve acelerado en la mezcla debido quizás a la aceleración de las reacciones de hidratación por la disponibilidad de agua adicional proporcionada por el curado interno mejorado.

Las mezclas de los grouts comerciales muestran un tiempo inicial de fraguado más tardío por lo que se supone que en sus constituyentes podrían existir aditivos con el efecto retardante del fraguado. La mezcla M4/FES en cambio presenta el tiempo de fraguado final más temprano, esta característica la podría proporcionar algún aditivo para satisfacer alguna necesidad de colocado y habilitación rápida en el campo.

De manera general se debe de tomar en consideración para solicitudes de colocado que las mezclas elaboradas en laboratorio presentan tiempos de fraguado inicial más tempranos, por lo que en su aplicación en campo se deben tomar las medidas necesarias para que su bombeo no se prolongue por un mayor tiempo en el que ya no presenten fluidez o trabajabilidad, o si el caso lo amerita se pueden emplear aditivos retardantes del fraguado para ampliar el tiempo de colocado. Las mezclas comerciales en cambio, dan un tiempo más prolongado para su colocación adecuada en el campo., por otro lado, tienen un tiempo de fraguado final temprano, lo que puede ser beneficioso

en obras en las que se necesite habilitar la estructura en un menor tiempo, esta característica también la tiene el grout M2/CIV.

#### **4.2.1.4 Calorimetría isotérmica**

La prueba de calorimetría isotérmica se realizó en las condiciones planteadas en el capítulo anterior, los resultados mostrados en las Figura 45 Figura 46 están en términos de los gramos de agua de las mezclas y no de los gramos de cemento, esto se debe a que no se conocía la proporción exacta en la que se encontraba presente el polvo reactivo (cemento) en los grouts comerciales, por lo que el registro del flujo de calor y calor liberado no se pudo realizar en términos de gramos de cemento.

La Figura 45 muestra el flujo de calor durante las primeras 24 horas de hidratación de los grouts. En el proceso de hidratación del cemento está descrito en cinco periodos, el primero es el periodo de las reacciones iniciales, el segundo, el periodo de inducción, seguido del periodo aceleratorio, continuando con el periodo desaceleratorio, y por último el periodo de reacciones lentas y continuas [77]. El primer pico de las curvas de flujo de calor se asocia normalmente al humedecido del cemento, la disolución del silicato y la caliza o a la formación de etringita [78]. Los tiempos de fraguado toman lugar en el periodo aceleratorio, en este periodo es donde los silicatos se hidratan rápidamente, hasta llegar a una tasa máxima, el pico máximo de calor coincide con el fin del periodo aceleratorio [79].

De las curvas mostradas en la Figura 45 se puede apreciar que la mezcla M2/CIV fue la que mostró menos reactividad, ya que desarrolló el flujo de calor más bajo, esto se debe a la presencia del aditivo modificador de la viscosidad que ralentiza los procesos de disolución y difusión que son los que intervienen en las reacciones de hidratación del cemento [3], la presencia de este aditivo también retarda las reacciones de hidratación [3, 79], esto se puede verificar en la amplitud del máximo pico de calor en esta mezcla, cuyo tiempo es de unas 16 horas, mientras la mezcla M1/REF es de solo 11 horas, este comportamiento se ha observado en otras investigaciones, en mezclas sin curado interno mejorado [3, 80], con la salvedad que el periodo aceleratorio se ve desplazado ligeramente un par de horas, esto se puede deber a la presencia del aditivo superfluidificante, que debido a su acción como dispersante de las partículas, influye en el retardo de la hidratación de las mismas [81–83].

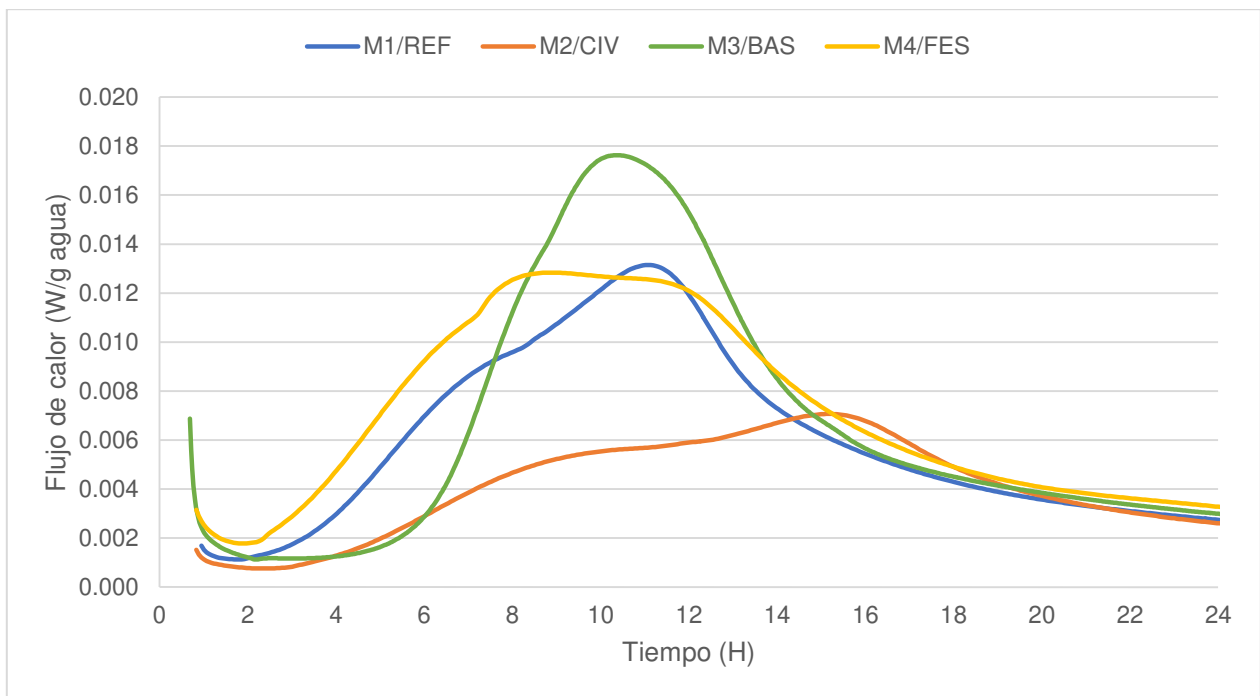


Figura 45 Flujo de calor en 24 horas de hidratación de los grouts

Las mezclas de grouts comerciales, por otro lado, muestran una aceleración mayor en las reacciones de hidratación, la mezcla M3/BAS por ejemplo presenta un retardo en el periodo de inducción, pero una vez alcanzado el periodo aceleratorio, éste se muestra con mayor reactividad (lo que se muestra en forma de una pendiente más pronunciada en la curva), así mismo la mezcla presenta el mayor flujo de calor desarrollado en las primeras 24 horas, lo que denota una mayor reactividad; por el comportamiento presentado en la mezcla, se supone que en la misma se podría encontrar un aditivo acelerante del tipo alcalino, por los resultados mostrados de FRX (Ver Tabla 2) el grout BAS presentó un alto contenido de óxido de sodio, los acelerantes alcalinos están compuestos principalmente por aluminatos de sodio o silicatos de sodio, un tipo de silicato de sodio hidratado se encontró en el difractograma del grout BAS (Ver Figura 42), lo que confirma la presencia de este tipo de aditivos en el grout, los iones de estos compuestos reaccionan con los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  para formar etringita y monosulfato, estas reacciones se dan de forma rápida lo que conlleva a una alta liberación de calor [84]. Por otro lado, después del periodo aceleratorio se ve una caída pronunciada de calor en la curva, se ha reportado que este comportamiento se debe a que después de la formación de monosulfatos, se da una formación avanzada de portlandita, debido al contenido de NaOH presente en los aditivos acelerantes alcalinos, que promueve la precipitación de la

portlandita [85], este proceso es endotérmico [86] por lo cual se observa una disminución en la intensidad de calor liberado.

La mezcla M4/FES fue la que obtuvo un menor tiempo en alcanzar el pico máximo de calor, por lo que se infiere que las reacciones de hidratación se vieron aceleradas, esto se puede deber a la presencia de aditivos acelerantes utilizados para la ganancia rápida de resistencia, también fue la mezcla que presentó un periodo desaceleratorio más prolongado, por lo que se supone que las reacciones de hidratación se ralentizaron debido probablemente a los aditivos presentes en su composición.

Por último, la Figura 46, muestra el calor liberado acumulado durante siete días de hidratación de las mezclas, el calor liberado por las reacciones de hidratación está relacionado a la ganancia de resistencia a compresión de mezclas cementicias [87–89], por lo que las curvas sugieren que las mezclas de grouts comerciales (M3 y M4) obtendrían una mayor resistencia a compresión, aunque esto no necesariamente se debe cumplir ya que los grouts comerciales, al tener aditivos y otros componentes diferentes a las mezclas con cemento portland únicamente, pudieron generar reacciones que si bien liberaban más calor, no necesariamente se deben traducir en la formación de CSH y en la ganancia de resistencia mecánica.

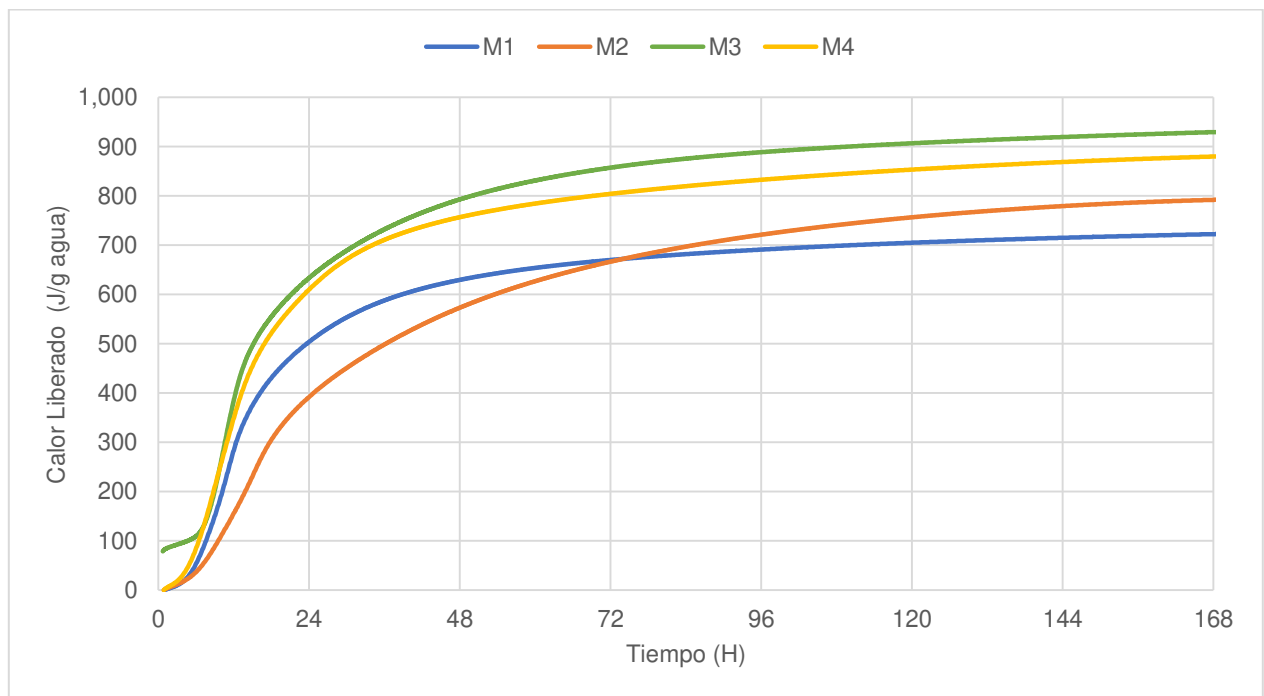


Figura 46 Calor liberado durante 7 días de hidratación de los grouts

En esta figura también se observa la acción del agua de curado interno, que después de las 72 horas de medición, la mezcla M2/CIV presenta un mayor calor liberado, por lo tanto un mayor grado de hidratación, en contraste con la mezcla de referencia, que al no tener más agua de curado el calor liberado no aumenta significativamente.

#### 4.2.2 Pruebas en estado endurecido

##### 4.2.2.1 Resistencia a compresión

###### 4.2.2.1.1 Resistencia a compresión en curado sumergido

La Figura 47 muestra los resultados de resistencia a compresión de especímenes en curado sumergido en agua saturada con cal, la mezcla M1 obtuvo la mayor resistencia en todas las edades, en general se supone que la mayor resistencia en esta mezcla se debe a la baja relación a/c y al alto contenido de cemento, la mezcla M2, si bien tiene estas mismas características, la presencia del agregado ligero que es poroso y menos resistente promueve que esta mezcla obtenga una menor resistencia [80]. Por otro lado las resistencias más bajas en las mezclas M3 y M4 con respecto a la M1, se pueden deber a una relación a/c más alta o a un más bajo contenido de cemento, debido a que no se conocen con exactitud las proporciones exactas de sus componentes ni la relación a/c exacta de las mezclas comerciales, estos pueden ser los factores que afecten sus resistencias.

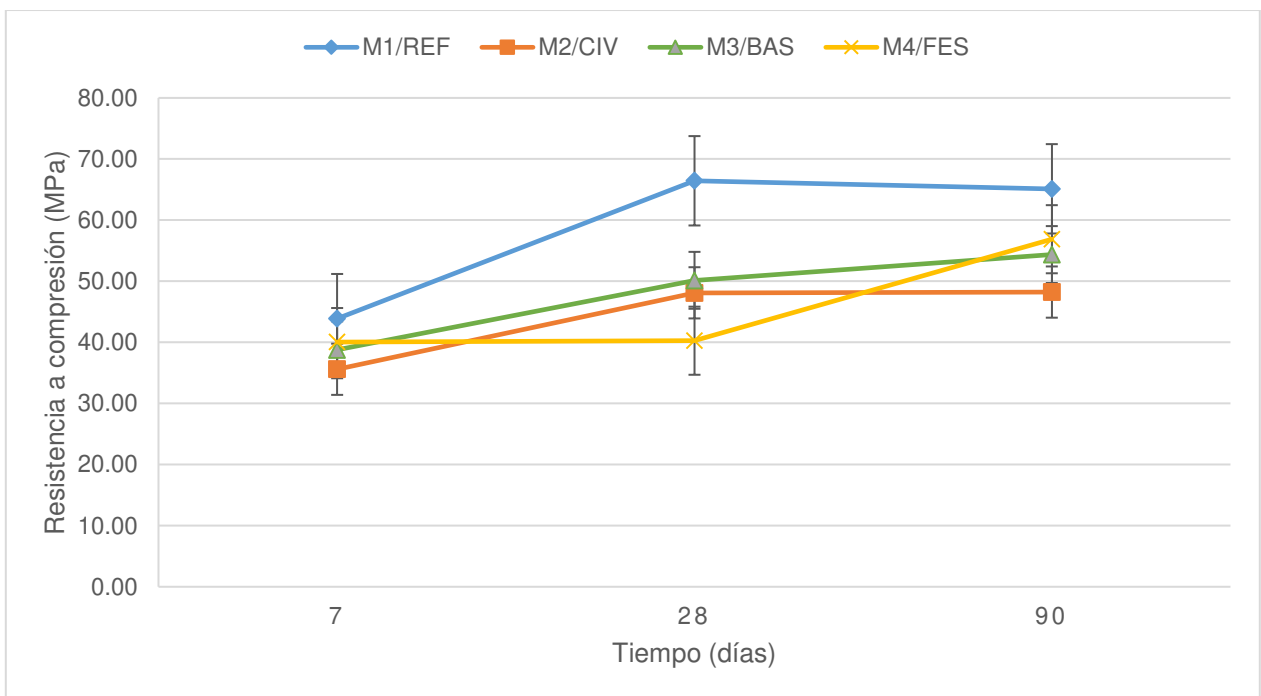


Figura 47 Resultados de resistencia a compresión de los especímenes en curado sumergido

#### 4.2.2.1.2 Resistencia a compresión en curado sellado

La Figura 48 muestra los resultados de resistencia a compresión de los especímenes curados de forma sellada, este tipo de curado se empleó para simular las condiciones de curado que un grout tendría dentro de una vaina de preesfuerzo (sin agua externa de curado), bajo estas condiciones la mezcla con curado interno tiene un mejor desempeño, ya que desarrolló una mayor resistencia con respecto a la mezcla de referencia, esto se debe a la disponibilidad de agua extra de curado que promueve una mayor hidratación, sobre todo a edades mayores [24], a las mezclas comerciales no les afectó la falta de agua de curado en todas las edades, ya que con el aumento en el tiempo de curado también se observa un aumento en la resistencia a la compresión.

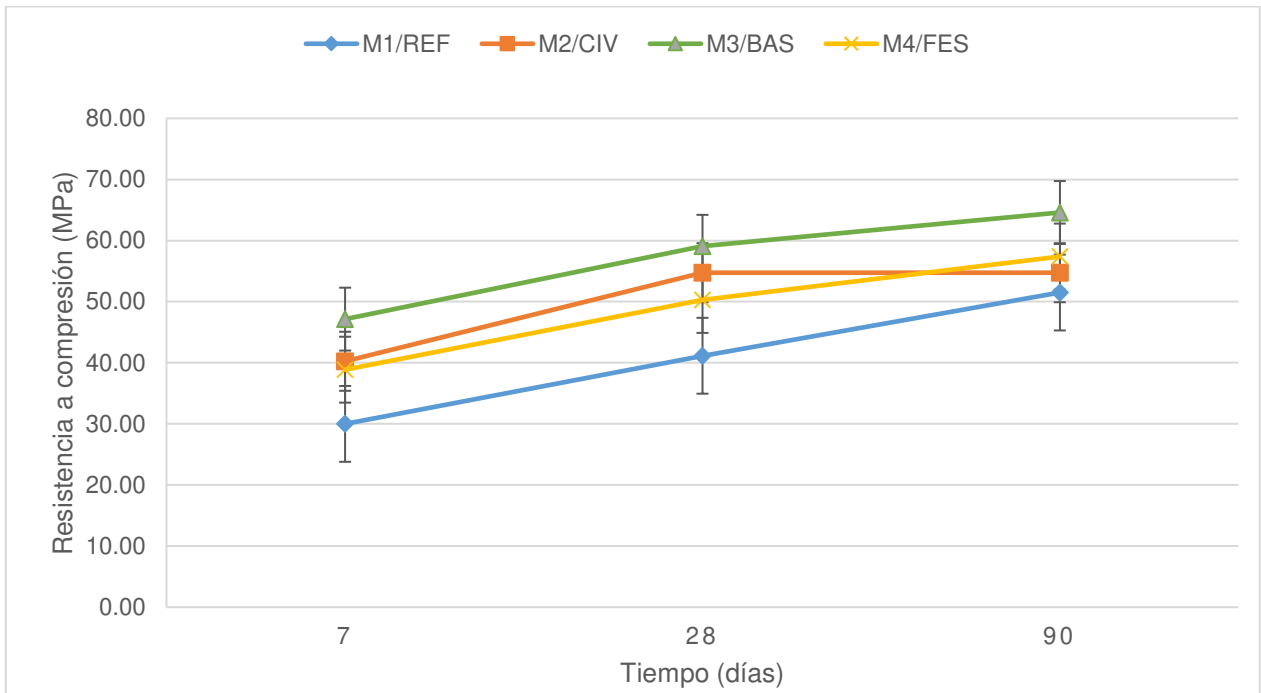


Figura 48 Resultados de resistencia a compresión de los especímenes en curado sellado

La Figura 49 muestra una relación entre los resultados de resistencia a compresión en curado sellado a la edad de siete días con el calor liberado a esta misma edad mostrados en la Tabla 17, como se puede observar ambos resultados muestran una correlación aceptable, por lo que por medio de los resultados de calorimetría se puede deducir la resistencia a la compresión de las mezclas [87–89].

Tabla 17 Resultados de resistencia a compresión en curado sellado y calor liberado a 7 días

Mezcla	Resistencia 7d	Calor liberado 7d
M1/REF	30.00	722.75
M2/CIV	40.25	792.46
M3/BAS	47.14	930.26
M4/FES	38.87	880.34

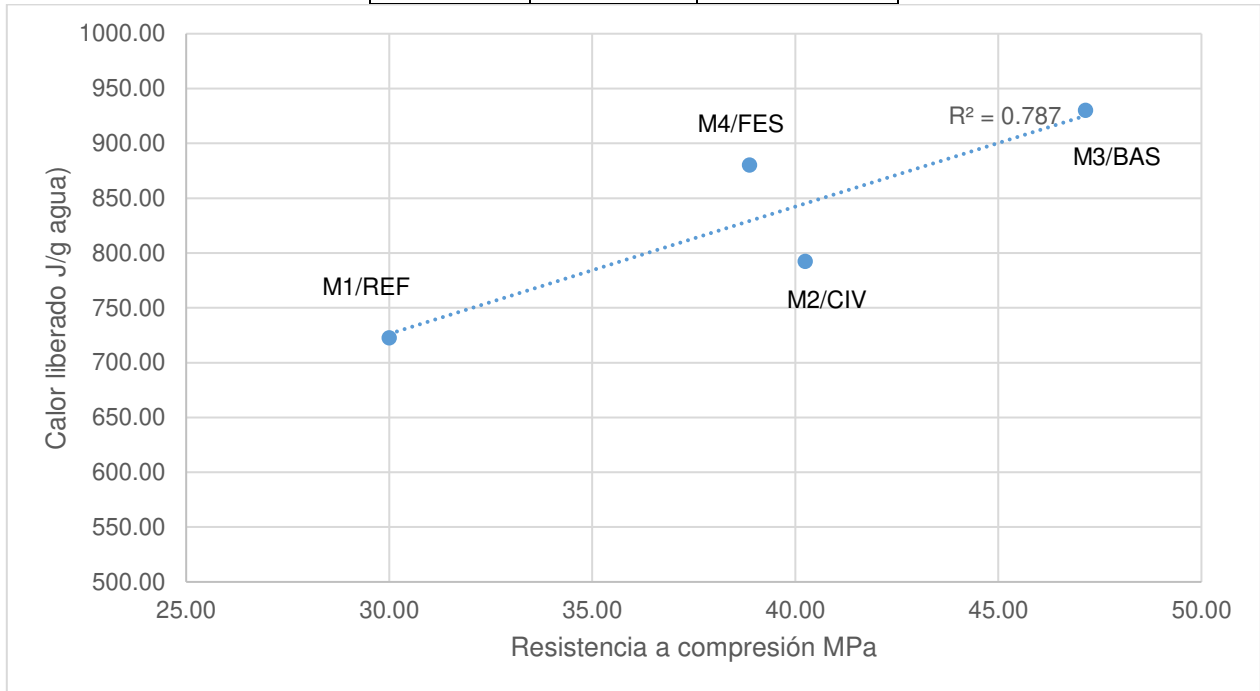


Figura 49 Resistencia a compresión vs Calor liberado a 7 días en curado sellado.

#### 4.2.2.1.3 Resistencia a compresión en curado en solución salina

La Figura 50 muestra los resultados de resistencia a compresión en curado en solución de NaCl al 3%, en general se puede observar que todas las mezclas obtuvieron una más alta resistencia temprana, con respecto a sus resultados en curado sumergido, esto se puede deber a la acción acelerante que tienen los iones cloruro en el proceso de hidratación del cemento [90]. De los resultados también se puede comentar que la mezcla M2 obtuvo una ganancia menor de resistencia temprana con respecto a la M1, lo que podría significar que una menor difusión de los iones cloruro se presentó en esta mezcla debido al efecto del aditivo modificador de la viscosidad que disminuye la difusión de estos iones.



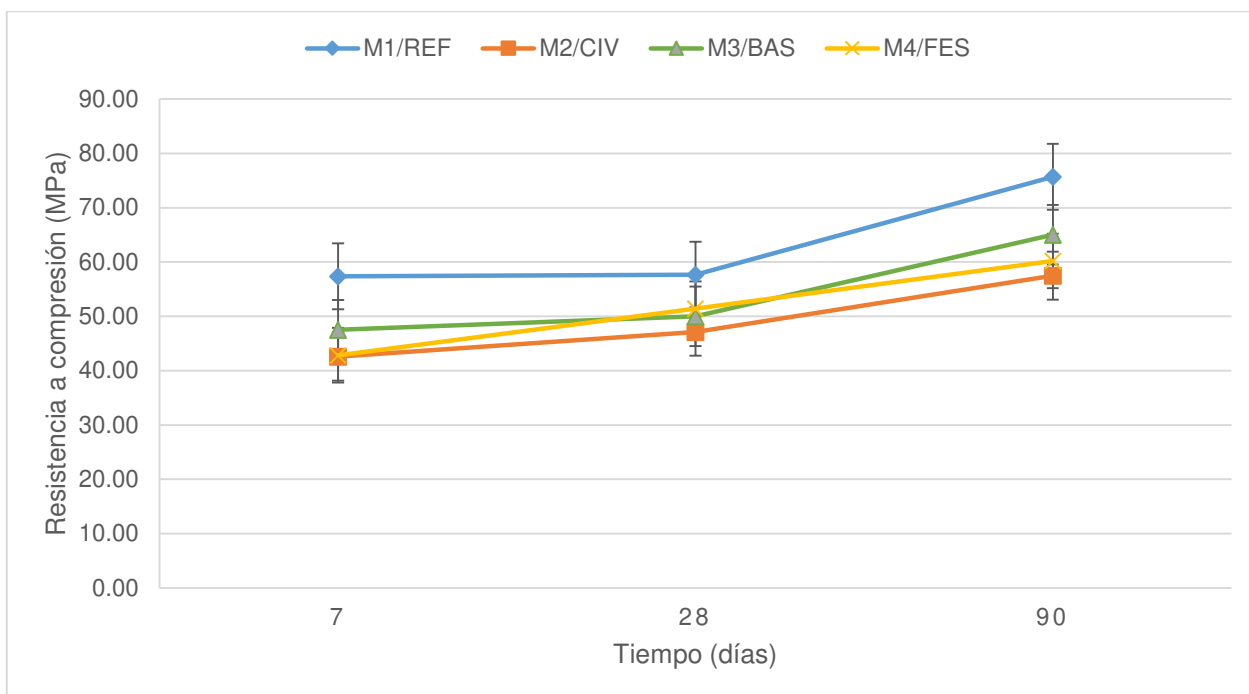


Figura 50 Resultados de resistencia a compresión de los especímenes en curado en solución salina

#### 4.2.2.2 Esfuerzo de adherencia

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión contra esfuerzo de adherencia evaluados en especímenes curados por 28 días, se presentan en la Tabla 18, los mismos están graficados en la Figura 51, en la gráfica se puede observar una buena correlación entre los resultados de ambos ensayos, y se puede comentar que las características de los componentes de las mezclas, en especial la presencia única de agregados de peso normal en las mezclas M1, M3 y M4 contribuyen a que las mismas obtengan resistencias más altas en ambos ensayos, la presencia del agregado ligero poroso en la mezcla M2 influye en su más bajo desempeño en ambos ensayos con respecto a las demás mezclas.

Tabla 18 Resultados de esfuerzo de adherencia y resistencia a compresión en curado sumergido a 28 días

Mezcla	Esfuerzo de adherencia 28d (Mpa)	Resistencia a compresión 28d (Mpa)
M1/REF	5.29	66.44
M2/CIV	3.54	48.10
M3/BAS	4.39	50.15
M4/FES	3.68	40.27

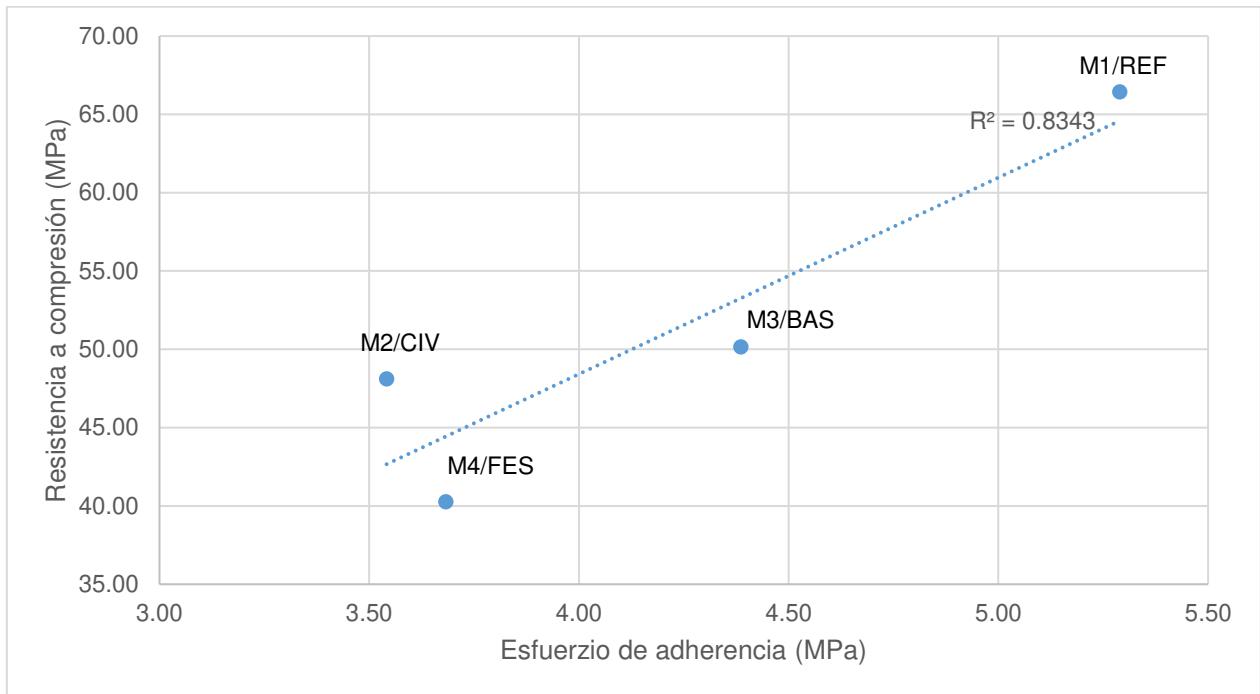


Figura 51 Resultados de resistencia a compresión y de esfuerzo de adherencia a los 28 días

#### 4.2.2.3 Contracción Autógena

La prueba de contracción autógena se realizó a las cuatro mezclas durante 28 días, sin embargo la mezcla M3/BAS presentó segregación y sangrado excesivo, provocando que el agua en el interior de los tubos corrugados se evaporara, y los mismos no quedarán completamente llenos (Ver Figura 52), por lo cual no se pudieron registrar sus contracciones. Las otras tres mezclas presentaron inconsistencias en los resultados, debido probablemente a las variaciones de temperatura en el lugar de ensayo, además de otras condiciones que pudieron provocar que los especímenes se agrietaran y liberaran tensiones, por lo que en este trabajo no se presentarán dichos resultados. Por lo anterior, se recomienda en trabajo futuro realizar la prueba bajo condiciones controladas según especifica la norma respectiva.



Figura 52 Espécimen de contracción autógena de la mezcla M3/BAS con la mitad de sección vacía

### **4.2.3 Pruebas de durabilidad**

#### **4.2.3.1 Medición de potencial y velocidad de corrosión**

La Figura 53 muestra los resultados de potenciales de corrosión medidos durante 321 días de exposición, de especímenes sumergidos en una solución al 3% de NaCl, la gráfica muestra que el acero en la mezcla M1/REF pudo haber sufrido una pasivación debido a la tendencia al equilibrio de sus potenciales por encima de los -230 mV con respecto al electrodo de calomel, a edades cercanas a los 90 días y posteriores; esto indica una baja probabilidad de que se presente un fenómeno de corrosión en el acero, por lo que esta mezcla se puede considerar como buen recubrimiento del acero. Los resultados de la mezcla M2/CIV en cambio, revelan que el acero embebido en la misma no presentó pasivación, ya que no se observa una tendencia al equilibrio de los potenciales, el comportamiento durante todo el periodo de exposición sugiere que en esta mezcla el acero pudo haber presentado un estado de corrosión, pero esto se confirmará con los resultados de velocidad de corrosión y de pérdida de masa en los especímenes.

El acero de los especímenes de la mezcla M3/BAS es el que muestra los potenciales más negativos, no muestra signos de pasivación en el acero y los valores tan bajos denotan una alta probabilidad de que un fenómeno de corrosión pudiera estar ocurriendo en el mismo. El acero en la mezcla M4/FES en cambio fue el segundo en obtener valores más positivos de potenciales de corrosión, y al igual que la mezcla M1/REF muestra signos de pasivación en el acero hasta la edad de 90 días debido a la tendencia al equilibrio de sus potenciales.

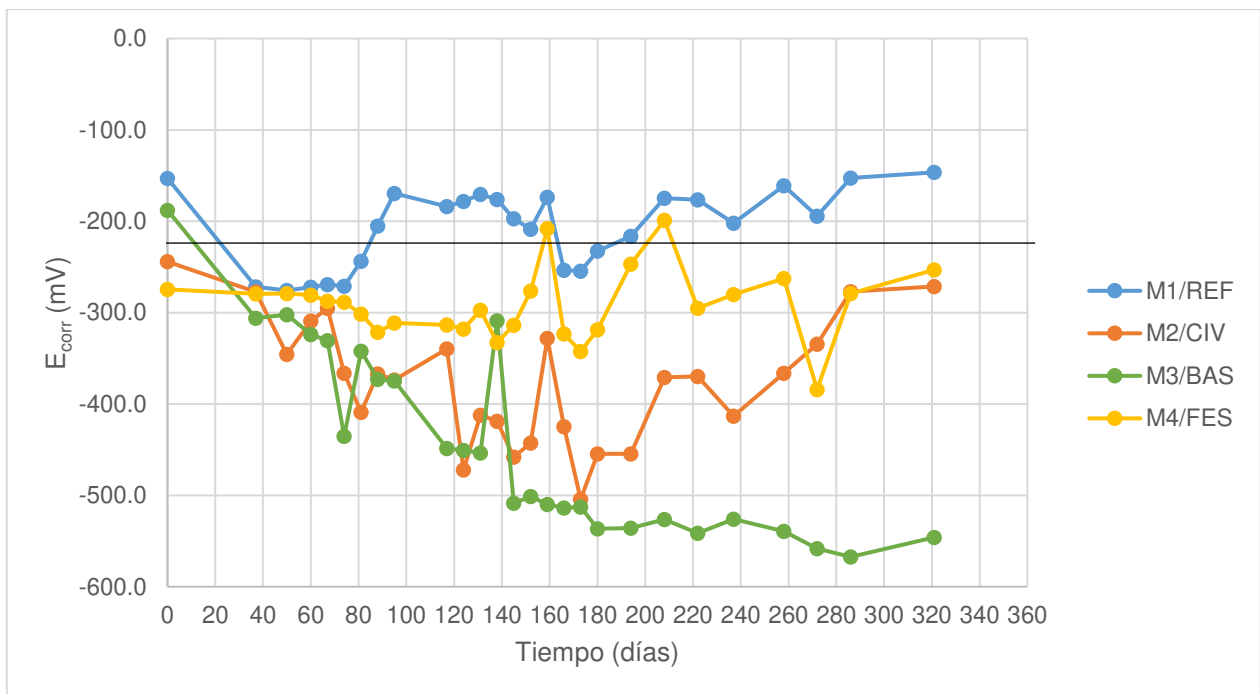


Figura 53 Potenciales de corrosión medidos a 321 días de exposición

La Figura 54 muestra los valores de velocidad de corrosión medidos durante 321 días de exposición; acorde a los resultados de potencial de corrosión, el acero en la mezcla M1/REF no muestra signos de que un proceso de corrosión se esté produciendo en él, ya que los valores de  $I_{corr}$  durante casi todo el tiempo de medición se encuentran por debajo del valor de  $0.1 \mu A/cm^2$  con respecto al electrodo de calomel, que es el límite para encontrar un nivel de corrosión bajo, estos resultados se confirman con la pérdida de masa obtenida en el acero de esta mezcla, que es la más baja (Ver Tabla 19), los resultados de la pérdida de masa se realizaron mediante autopsia de los alambres de preesfuerzo.

Los resultados en la mezcla M2/CIV revelan que un nivel de corrosión moderado se pudo haber producido en el acero, ya que los valores de  $I_{corr}$  se encuentran por encima de  $0.1 \mu A/cm^2$  sobre todo en el periodo entre los 120 y 240 días de exposición, en los últimos días de medición la gráfica muestra una tendencia a valores más bajos de  $I_{corr}$ , lo que sugiere una posible pasivación del acero en edades posteriores, el pico más alto en la gráfica de esta mezcla se da a los 173 días, esto se puede deber a la formación de una picadura en el acero por la acción de los iones cloruro. La pérdida de masa del acero embebido en esta mezcla es la tercera más baja, muy cercana a la del acero en la mezcla comercial M4/FES.

De manera congruente con los resultados de  $E_{corr}$ , el acero en la mezcla M3/BAS muestra los valores de  $I_{corr}$  más altos en la gráfica, los diferentes picos altos cercanos y por encima de  $1 \mu A/cm^2$  sugieren que un nivel de corrosión alto se dio en el acero, estos picos también se pueden deber a la formación de picaduras en la superficie del acero. La Tabla 19 también nos ayuda a confirmar el nivel de corrosión ya que el acero en esta mezcla es el que obtuvo una mayor pérdida de masa, llegando casi al 1%.

El acero embebido en la mezcla M4/FES muestra también signos de bajo nivel de corrosión en casi todo el tiempo de medición, sus valores de  $I_{corr}$  en casi toda la exposición estuvieron por debajo del límite de  $0.1 \mu A/cm^2$ , la pérdida de masa de los especímenes es la segunda más baja, después de la obtenida en los especímenes de la mezcla M1/REF.

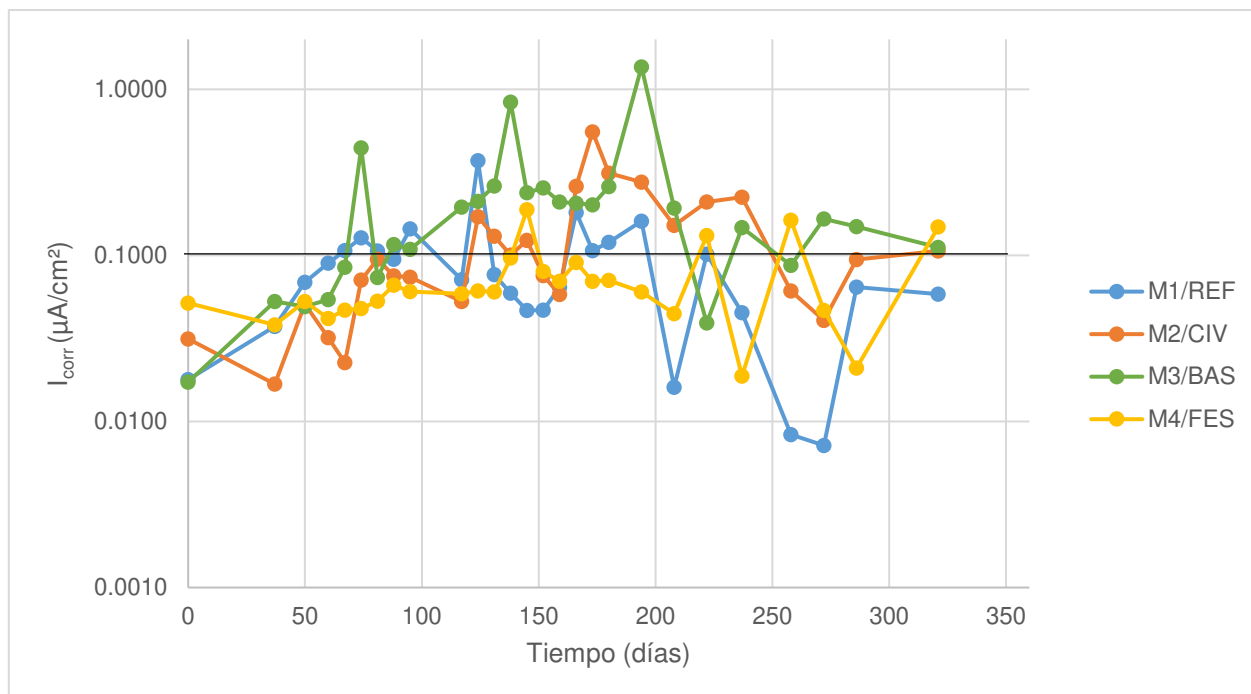


Figura 54 Velocidades de corrosión medidas a 321 días de exposición

Tabla 19 Porcentajes de pérdida de masa obtenidos en los especímenes de acero embebidos en las mezclas.

Mezcla	Pérdida de masa (%)
M1/REF	0.31%
M2/CIV	0.67%
M3/BAS	0.91%
M4/FES	0.66%

Finalmente la Figura 55 muestra los valores de  $I_{corr}$  acumulada durante los 321 días de medición, esta gráfica se utiliza para determinar cualitativamente en qué tiempo se produce la despasivación del acero, y se hace reconociendo el punto donde un aumento significativo y un cambio abrupto en la pendiente de la gráfica de  $I_{corr}$  acumulada se observa en las mediciones[92, 93]. De manera general se puede observar que el acero en todas las mezclas presenta un aumento equilibrado de  $I_{corr}$ , excepto en la mezcla M3/BAS que desde la edad de 138 días muestra un cambio abrupto en la  $I_{corr}$  acumulada, lo que sugiere que a partir de ese punto, el acero en esta mezcla sufrió despasivación.

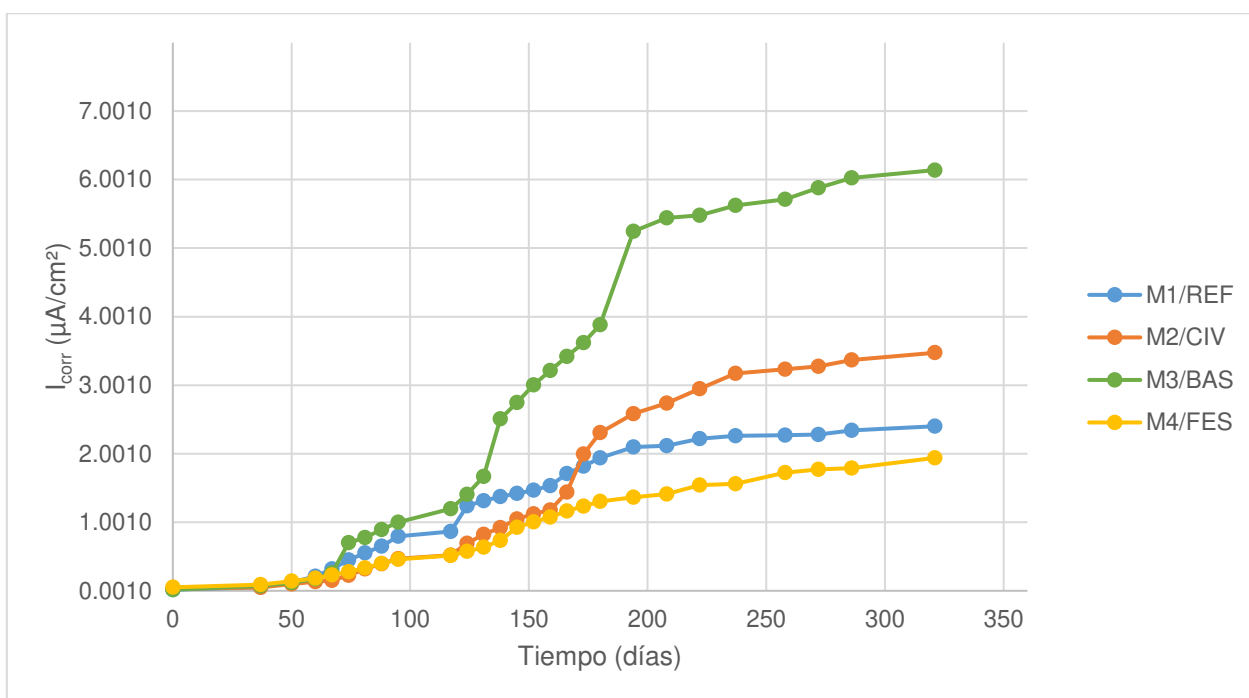


Figura 55 Velocidad de corrosión acumulada durante 321 días de exposición

De manera general se puede apreciar que la mezcla M3/BAS es la que presentó un pobre desempeño como recubrimiento y protector del acero contra la corrosión, esta mezcla en todas las pruebas presentaba excesivo sangrado y segregación lo que dejaba una apariencia porosa en los especímenes, por lo que dicha porosidad pudo haber permitido un mayor ingreso de iones cloruro. La otra mezcla comercial por el contrario muestra un buen desempeño como recubrimiento del acero, al obtener velocidades de corrosión bajas, la fluidez de la mezcla mejoraba las propiedades de colocación y los especímenes de la misma presentaban una apariencia más densa y menos porosa.

De las mezclas elaboradas en laboratorio se puede decir que ambas presentaron propiedades de fluidez y apariencias similares, y aunque la mezcla M1/REF muestra un buen desempeño al obtener bajas velocidades de corrosión en el acero embebido, el proceso al cual fueron sometidos los especímenes no permite que un proceso de corrosión se presente de manera acelerada y en tan corto tiempo, y aunque en la mezcla M2/CIV pudieron ingresar iones cloruro en algunas etapas, no sobrepasaron el nivel crítico como para despasivar el acero.

Al ser estas pruebas una medida del comportamiento del acero más que del recubrimiento se deben complementar con las otras pruebas de durabilidad para determinar la calidad y desempeño de las mezclas como protectores del acero ante la corrosión.

#### **4.2.3.2 Medición de resistividad eléctrica superficial**

La Figura 56 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%, en la gráfica se observa que la mezcla M1/REF no obtuvo un cambio o aumento de resistividad considerable durante los 28 días de medición, este comportamiento es normal para mezclas en las que sólo cemento portland es utilizado [92–94], la mezcla M3/BAS tampoco muestra una ganancia significativa de resistividad con el tiempo, como se ha mencionado anteriormente esta mezcla presentaba problemas de segregación, sangrado y porosidad, por lo que esto puede influenciar en el poco aumento de resistividad; por su valor indicado a los 35 días de medición, y según la norma AASHTO TP95 [70], estas mezclas se catalogan como mezclas con alta penetrabilidad de iones cloruro ya que sus valores de resistividad se encuentran por debajo a los 12 K $\Omega$ -cm.

Para el caso de la mezcla M4/FES, durante todo el tiempo de medición, muestra resultados por encima de los 12 K $\Omega$ -cm, esto la cataloga como una mezcla con moderada penetrabilidad de iones cloruro; teniendo su máxima lectura de 18 K $\Omega$ -cm a los 28 días; a partir de esta edad, la resistividad comienza a variar y a descender, esto se puede deber a los cambios en el estado de saturación de los especímenes debido al tiempo de curado en el cuarto de humedad relativa alta; el grado de saturación de las mezclas afecta significativamente la resistividad eléctrica de las mismas; el agua al ser un material

conductor y al estar presente en mayor cantidad en mezclas saturadas influye en el decremento de las lecturas de resistividad.

Por último, la mezcla M2/CIV desde el inicio de las mediciones presenta mayores lecturas de resistividad eléctrica con respecto a la mezcla de referencia, y aunque sus componentes son casi iguales, y solo cemento portland ordinario se utilizó en ambas mezclas, la acción del aditivo modificador de la viscosidad que es desorbido mediante el curado interno influye en el aumento de la resistividad con el paso del tiempo. El paso de la corriente eléctrica a través de una mezcla cementicia está íntimamente relacionado con la movilidad iónica a través de las mezclas [96], por lo que en esta mezcla se confirma que la acción del curado interno mejorado modifica la viscosidad (aumentándola) en la solución de poro, lo que conlleva un decremento en la movilidad iónica, y se refleja en valores más altos de resistividad a través del tiempo. A la edad de 140 días esta mezcla ya presenta valores de 21 K $\Omega$ -cm, observándose una tendencia al aumento de la resistividad, y aunque las mediciones se detuvieron para poder realizar la prueba de permeabilidad de iones cloruro en tiempo, los valores de esta mezcla la catalogan como una mezcla de baja penetrabilidad de iones cloruro.

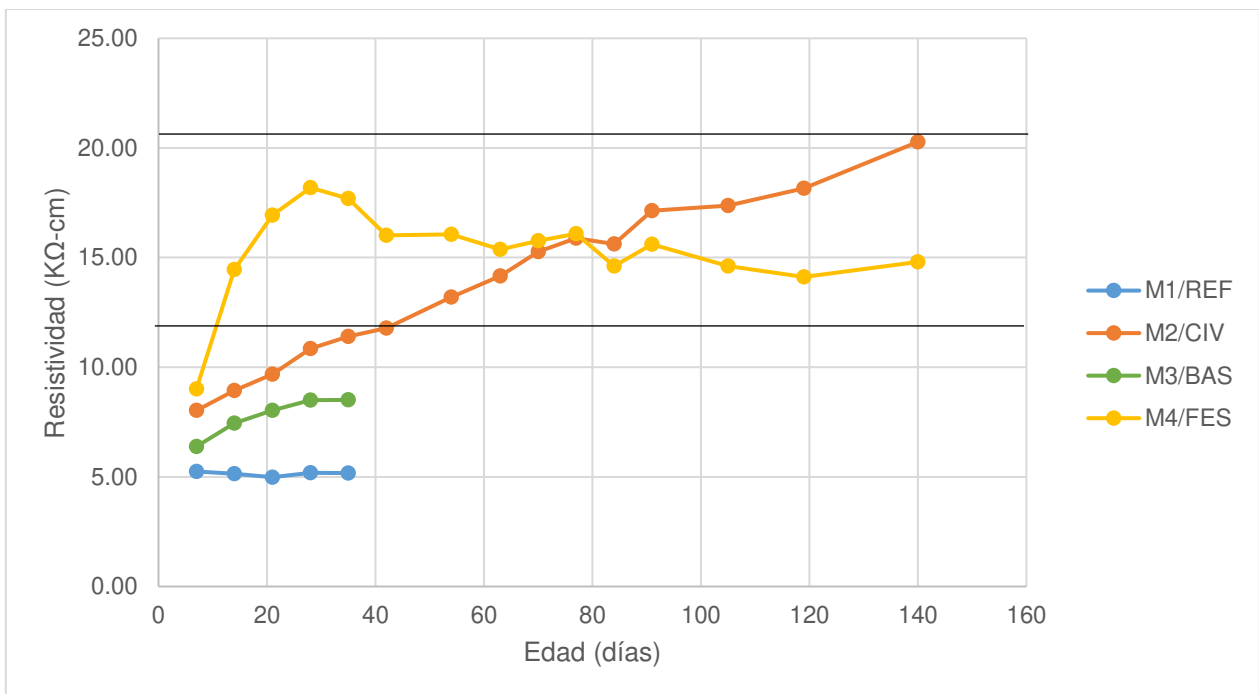


Figura 56 Resistividad eléctrica superficial medida a 140 días



### 4.2.3.3 Permeabilidad rápida a los iones cloruro

Los resultados de la resistencia a la penetración de iones cloruro en las mezclas se muestran en la Tabla 20, al igual que la prueba de resistividad eléctrica superficial, la prueba de permeabilidad nos brinda un indicador de la calidad de las mezclas evaluadas según la carga pasada en Coulombs que las cataloga como mezclas con muy baja, baja, moderada y alta penetrabilidad de iones cloruro.

De manera consistente y similar a los resultados de la prueba de resistividad, la mezcla M1/REF muestra una alta penetrabilidad de iones cloruro al ser la mezcla con mayor carga pasada de todas las evaluadas, esto se debe principalmente a que esta mezcla no tiene ninguna adición mineral o aditivo químico que promueva una mayor densificación en la matriz cementante o que modifique las propiedades de la mezcla para disminuir la movilidad iónica en la misma.

La mezcla M2/CIV por otro lado, es la mezcla con menor carga pasada a través de ella, consistente con los resultados de resistividad, la mezcla presenta una baja penetrabilidad de iones cloruro, debido principalmente a la modificación de la viscosidad en la solución de poro promovida por el curado interno mejorado, que disminuye la difusión de iones como los cloruros.

Las dos mezclas comerciales (M3/BAS y M4/FES) muestran una moderada penetrabilidad de iones cloruro, estos resultados están en concordancia con los resultados de resistividad, ya que la carga pasada por la mezcla M3/BAS está ligeramente por debajo del límite de 4000 Coulombs para que la misma sea catalogada como de alta penetrabilidad, al igual que en la mezcla M4/FES muestra una moderada penetrabilidad y en ser la segunda mezcla con mayor valor de resistividad y con menor carga pasada después de la mezcla M2/CIV.

Tabla 20 Resultados de la resistencia a la penetración de iones cloruro de las mezclas

<b>Mezcla</b>	<b>Carga pasada (Coulombs)</b>	<b>Penetrabilidad de iones cloruro</b>
M1/REF	4430.79	Alta
M2/CIV	1299.83	Baja
M3/BAS	3652.705	Moderada
M4/FES	2542.78	Moderada

Finalmente la Figura 57 muestra la relación existente entre los datos de resistividad eléctrica superficial, a los cuales se les realizó el inverso para dejarlos en términos de conductividad y los datos de la carga pasada en Coulombs de las cuatro mezclas mostrados en la Tabla 21, y en concordancia con lo mencionado anteriormente la correlación entre ambas mediciones es muy buena, como se ha observado en otras investigaciones [97–99], y como se espera, entre mayor es la resistividad, por lo tanto menor la conductividad, menor es la penetrabilidad de iones cloruros, evaluada en términos de la carga pasada en Coulombs.

Tabla 21 Resultados de conductividad eléctrica y carga pasada de las mezclas

Mezcla	Conductividad eléctrica (KΩ-cm) <sup>-1</sup>	Carga pasada (Coulombs)
M1/REF	0.16	4430.79
M2/CIV	0.04	1299.83
M3/BAS	0.09	3652.705
M4/FES	0.07	2542.78

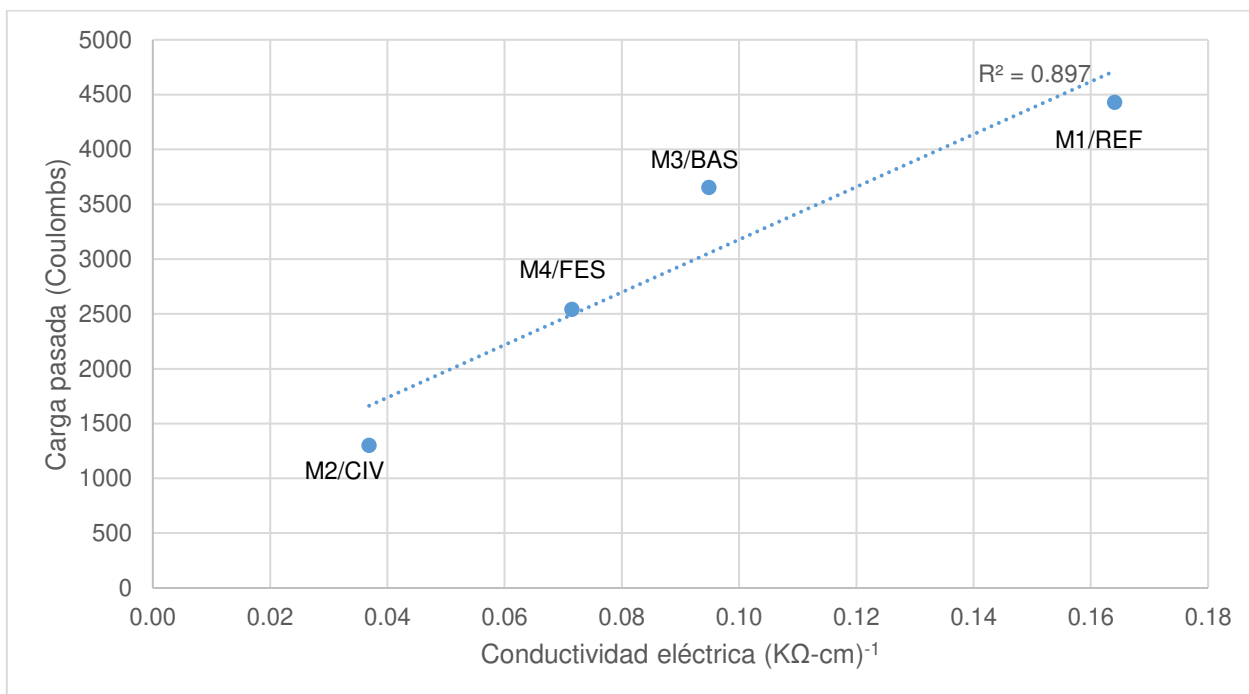


Figura 57 Conductividad eléctrica vs Carga pasada

## 4.2.4 Pruebas de caracterización complementaria

### 4.2.4.1 Microscopía electrónica de barrido

La Figura 58 muestra las micrográficas de la mezcla M1/REF a 28 días en curado sumergido y curado sellado, en la misma se observa que en la mezcla con curado sellado la microestructura de la pasta circundante al agregado es más porosa y menos densa, debido principalmente a la falta de agua de curado que propicia una menor hidratación en comparación con la de curado sumergido. También la mezcla en curado sellado presenta algunos agrietamientos (Ver Figura 59) generados por la desecación y contracción del cemento, en ausencia de agua de curado.

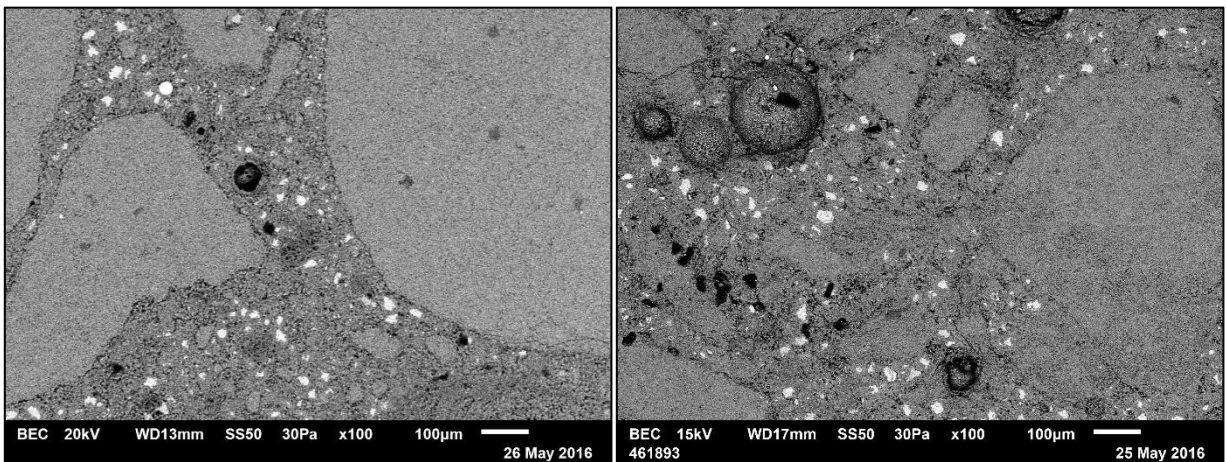


Figura 58 Micrográficas a 100x de la mezcla M1/REF a 28 días en curado sumergido (izq.) y en curado sellado (der.)

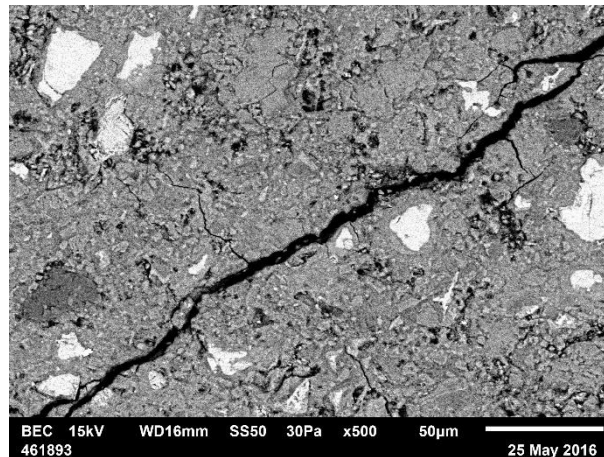


Figura 59 Agrietamientos observados en la pasta de la mezcla M1/REF en curado sellado.

Por otro lado las micrográficas mostradas en la Figura 60, muestran una matriz cementicia más densa en la mezcla M2/CIV en ambos tipos de curado, debido principalmente a la mayor hidratación proveída por la solución desorbida por el agregado

ligero como vehículo del curado interno mejorado, en concordancia con lo observado en la Figura 46. Esta densificación en la matriz es más notoria en el curado sellado, ya que la mayor hidratación es proporcionada únicamente por el agua adicional de curado aportada por el curado interno mejorado, como se puede observar en las Figura 60 y Figura 61, se pueden comparar las mezclas de referencia y la de curado interno a iguales magnificaciones y se comprueba que el curado interno mejorado brinda un beneficio con la densificación de la matriz cementicia debida a la mayor hidratación, al igual que se observan menos agrietamientos en la mezcla de curado interno mejorado. Adicionalmente no se observan porosidades o vacíos en la pasta debidas al aire atrapado, por lo que se reafirma que el mayor contenido de aire presentado en la Tabla 14 por la mezcla M2/CIV se debe al aire atrapado en el agregado ligero poroso.

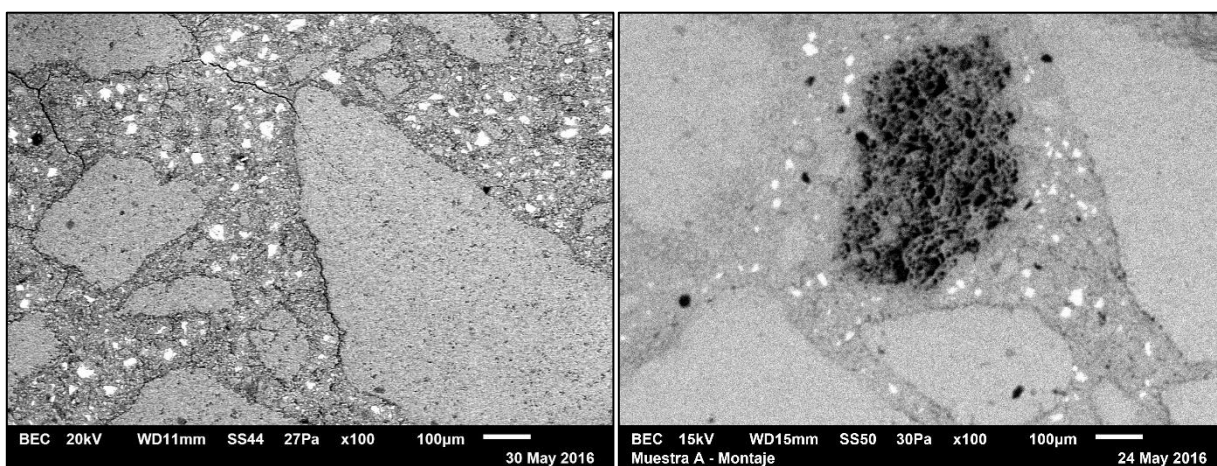


Figura 60 Micrografías a 100x de la mezcla M2/CIV a 28 días en curado sumergido (izq.) y en curado sellado (der.)

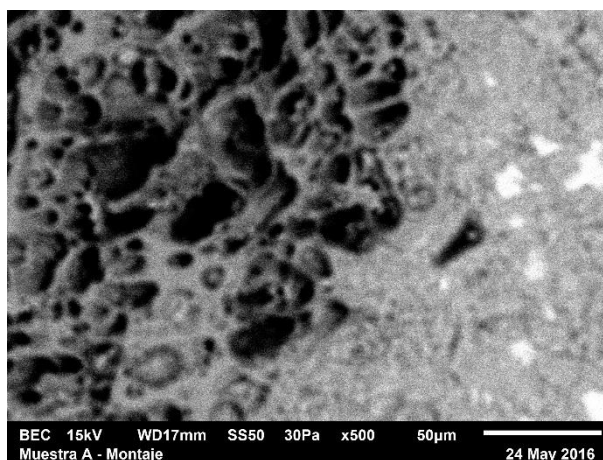


Figura 61 Interfaz agregado ligero-pasta de cemento en mezcla M2/CIV a 28 días de curado sellado.

Las micrografías de las mezclas comerciales M3/BAS y M4/FES en curado sumergido y sellado a 28 días se muestran en las Figura 62 y Figura 63 , es notoria la influencia del tipo de curado en la apariencia de la microestructura de la matriz cementicia en estas mezclas, la falta de agua de curado hace que se muestre una mayor cantidad de cemento anhidro (puntos más blancos) en la pasta de cemento alrededor de los agregados, también se pueden observar agrietamientos debido a la falta de agua de curado, se puede mencionar que las matrices de estas mezclas se muestran menos densas que la de la mezcla de curado interno, lo que demuestra el mejor desempeño en cuanto a hidratación de la mezcla M2/CIV frente a las mezclas comerciales.

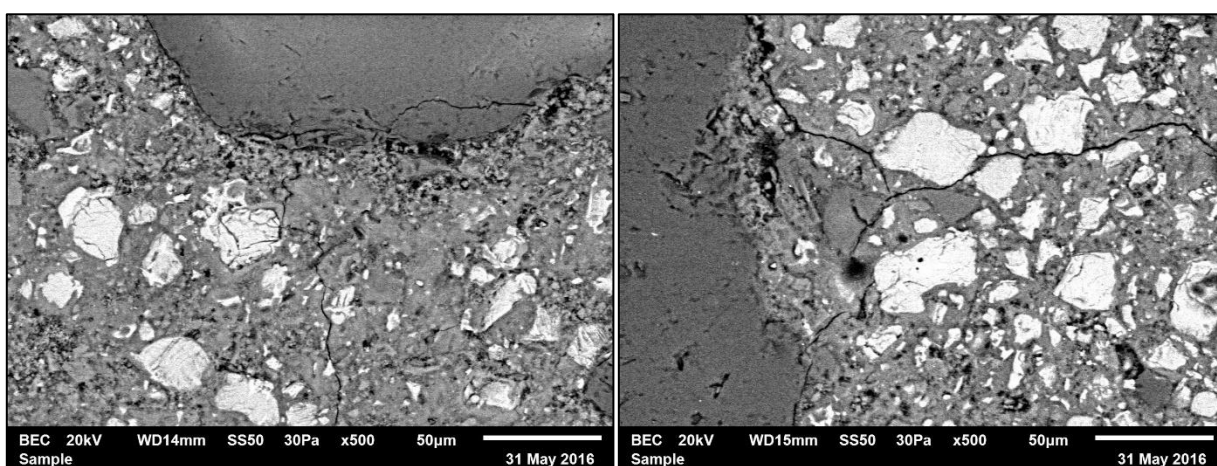


Figura 62 Micrografías a 500x de la mezcla M3/BAS a 28 días en curado sumergido (izq.) y en curado sellado (der.)

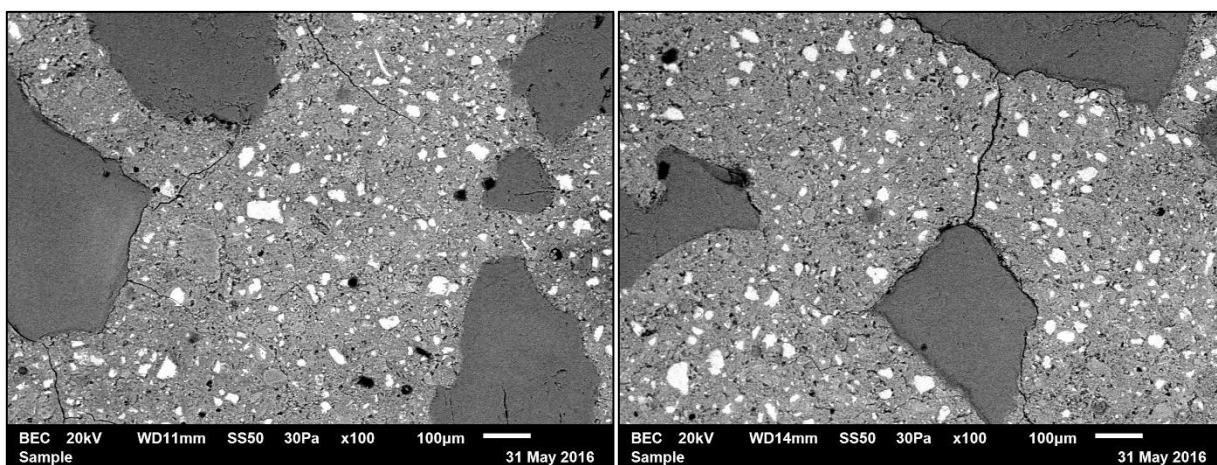


Figura 63 Micrografías a 100x de la mezcla M4/FES a 28 días en curado sumergido (izq.) y en curado sellado (der.)

La caracterización microscópica presentada, permite resaltar los beneficios que ofrece el curado interno mejorado con relación a las condiciones habituales en las cuales se colocan y se curan estas mezclas, dichas condiciones propician agrietamientos y porosidades que significan un riesgo para los torones de acero. Los grouts con curado interno mejorado, al tener una cantidad adicional de agua al interior, mejoran la hidratación del cemento, densificando la matriz en ausencia de agua externa de curado, previniendo agrietamientos, que son visibles en las mezclas sin curado interno de laboratorio como comerciales.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos y discusiones realizadas acerca de los mismos, y tomando en consideración las condiciones y materiales específicos empleados en esta investigación se pueden realizar las siguientes conclusiones:

1. Con un proporcionamiento y procedimiento de mezclado adecuados, es posible elaborar en laboratorio, grouts con las propiedades de fluidez y colocación necesarias para utilizarse como rellenos de tendones de preesfuerzo, utilizando materiales disponibles en el área, y pudiendo también aplicar estos procedimientos en la obra.
2. Los grouts elaborados en laboratorio pueden competir efectivamente con los grouts comerciales en cuanto a las propiedades mecánicas, factor importante en su uso como recubrimiento de torones en tendones de preesfuerzo.
3. El tipo de curado afecta directamente el desempeño en cuanto a propiedades mecánicas de los grouts comerciales y de laboratorio, siendo el curado sellado el más crítico debido a que la ausencia de agua externa de curado disminuye las propiedades mecánicas de los grouts, en este sentido, el curado interno mejorado hace notoria su eficacia en la mejora de las propiedades mecánicas debido a la mayor hidratación brindada por el agua interna adicional provista por medio de agregados ligeros saturados.
4. Los aditivos químicos (acelerantes, modificadores de la viscosidad, superfluidificantes, etc.) afectan de manera notoria la cinética de hidratación de los grouts, por medio de los resultados de calorimetría isotérmica se puede concluir que el aditivo modificador de la viscosidad en la mezcla de curado interno mejorado ralentiza el proceso de hidratación, y que los aditivos acelerantes del tipo alcalino, si bien aceleran las reacciones de hidratación y aumentan el flujo de calor en los grouts comerciales, no necesariamente se traduce en una mayor ganancia de resistencia mecánica.
5. En cuanto a las propiedades e indicadores de durabilidad, el curado interno mejorado brinda algunos beneficios tales como la eliminación de agrietamientos debido a las contracciones, como también el aumento en la resistividad eléctrica superficial y la disminución en la penetrabilidad de iones cloruro. Sin embargo es necesario realizar estudios más profundos con relación a las pruebas

electroquímicas, puesto que los resultados obtenidos no permiten afirmar por completo el mejor desempeño de esta mezcla.

6. El curado interno mejorado es una tecnología que empleada en grouts utilizados para recubrimiento de tendones de preesfuerzo, puede funcionar como protector del acero de preesfuerzo ante la corrosión debido a que disminuye los agrietamientos que son vías de acceso de iones como los cloruros, así como disminuye la penetración de los mismos en las mezclas cementicias.

## **RECOMENDACIONES**

Con base en las experiencias obtenidas en esta investigación, y considerando las áreas de oportunidad que se pueden atacar en trabajos futuros se realizan las siguientes recomendaciones y sugerencias.

1. Ampliar la cantidad de mezclas a investigar, incluyendo mezclas con materiales cementantes suplementarios con y sin curado interno mejorado, además de utilizar un agente de curado interno diferente a los agregados ligeros, para evaluar su desempeño en la mejora de propiedades mecánicas y de durabilidad en mezclas de grouts.
2. Evaluar el desempeño del curado interno en la mitigación de otras contracciones además de la autógena en mezclas de grouts para tendones de preesfuerzo.
3. Evaluar potenciales y velocidades de corrosión utilizando medios de exposición acelerados para poder observar algún fenómeno de corrosión severo en un menor tiempo de experimentación, para que los resultados sean representativos y considerables.
4. De ser posible, se recomienda que las diferentes mezclas de grouts se utilicen en una verdadera estructura de concreto preesforzado a escala (viga), para evaluar tanto las propiedades mecánicas del elemento, influenciadas por las propiedades y composiciones de los grouts, además de evaluar sus propiedades de colocado reales y su desempeño como protector del acero ante un medio de corrosión acelerado.
5. Realizar la prueba de contracción autógena en un ambiente con las condiciones de temperatura controladas para una medición que arroje resultados consistentes,



que permitan evaluar de manera efectiva el desempeño del curado interno en la mitigación de este tipo de contracción.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Coronelli, A. Castel, N. A. Vu, and R. Francois, "Corroded post-tensioned beams with bonded tendons and wire failure," *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 8, pp. 1687–1697, 2009.
- [2] N. A. Vu, A. Castel, and R. François, "Effect of stress corrosion cracking on stress-strain response of steel wires used in prestressed concrete beams," *Corros. Sci.*, vol. 51, no. 6, pp. 1453–1459, 2009.
- [3] D. P. Bentz, K. A. Snyder, and M. A. Peltz, "Doubling the service life of concrete structures. II: Performance of nanoscale viscosity modifiers in mortars," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 3, pp. 187–193, 2010.
- [4] E. A. B. Khalil and M. Anwar, "Carbonation of ternary cementitious concrete systems containing fly ash and silica fume," *Water Sci.*, vol. 29, no. 1, pp. 1–9, 2015.
- [5] Y. Ji, Y. Hu, L. Zhang, and Z. Bao, "Laboratory studies on influence of transverse cracking on chloride-induced corrosion rate in concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 69, pp. 28–37, 2016.
- [6] D. P. Bentz and B. J. Mohr, "SP-256: Internal Curing of High Performance Concrete: Lab and Field Experiences," *Spec. Publ.*, vol. 256.
- [7] M. Otieno, H. Beushausen, and M. Alexander, "Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete - Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments," *Cem. Concr. Res.*, vol. 79, pp. 373–385, 2016.
- [8] F. Rosquoët, A. Alexis, A. Khelidj, and A. Phelipot, "Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 713–722, 2003.
- [9] A. Durán-Herrera, J. M. Mendoza-Rangel, E. U. De-Los-Santos, F. Vázquez, P. Valdez, and D. P. Bentz, "Accelerated and natural carbonation of concretes with internal curing and shrinkage/viscosity modifiers," *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 4, pp. 1207–1214, 2014.
- [10] K. A. Snyder, D. P. Bentz, and J. M. Davis, "Using Viscosity Modifiers to Reduce Effective Diffusivity in Mortars," *ASCE J. Mater. Civ. Eng.*, pp. 1017–1024, 2011.
- [11] D. P. Bentz, J. M. Davis, M. A. Peltz, and K. A. Snyder, "Influence of internal curing and viscosity modifiers on resistance to sulfate attack," *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 4, pp. 581–589, 2013.

- [12] B. B. Hope and A. K. C. Ip, "Grout for Post-tensioning ducts.," *ACI Mater. J.*, vol. 85, no. 4, pp. 234–240, 1988.
- [13] D. R. Lankard, N. Thompson, M. M. Sprinkel, and Y. P. Virmani, "Grouts for bonded post-tensioned concrete construction: Protecting prestressing steel from corrosion," *ACI Mater. J.*, vol. 90, no. 5, pp. 406–414, 1993.
- [14] A. Y. K. H. Khayat and P. Duffy, "High-Performance Cement Grout for Post-Tensioning Applications," *Mater. J.*, vol. 96, no. 4.
- [15] A. J. Schokker, J. E. Breen, and M. E. Kreger, "Grouts for bonded post-tensioning in corrosive environments," *ACI Mater. J.*, vol. 98, no. 4, pp. 296–305, 2001.
- [16] H. Minh, H. Mutsuyoshi, and K. Niitani, "Influence of grouting condition on crack and load-carrying capacity of post-tensioned concrete beam due to chloride-induced corrosion," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 7, pp. 1568–1575, 2007.
- [17] O. F. Hussien, T. H. K. Elafandy, a. a. Abdelrahman, S. a. Abdel Baky, and E. a. Nasr, "Behavior of bonded and unbonded prestressed normal and high strength concrete beams," *HBRC J.*, vol. 8, no. 3, pp. 239–251, 2012.
- [18] L. Wang, X. Zhang, J. Zhang, Y. Ma, Y. Xiang, and Y. Liu, "Effect of insufficient grouting and strand corrosion on flexural behavior of PC beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 213–224, 2014.
- [19] M. Moawad, H. El-Karmoty, and A. El Zanaty, "Behavior of corroded bonded fully prestressed and conventional concrete beams," *HBRC J.*, pp. 1–13, 2016.
- [20] D. P. Bentz, K. A. Snyder, L. C. Cass, and M. A. Peltz, "Doubling the service life of concrete structures. I: Reducing ion mobility using nanoscale viscosity modifiers," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 8, pp. 674–678, 2008.
- [21] D. P. Bentz, M. A. Peltz, K. A. Snyder, and J. M. Davis, "VERDiCT: Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology A new approach to decreasing transport," *Concr. Int.*, vol. 31, no. 1, pp. 31–36, 2009.
- [22] D. P. Bentz and K. A. Snyder, "Protected Paste Volume in Concrete Extension to Internal Curing using Saturated Lightweight Fine Aggregate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 1863–1867, 1999.
- [23] P. Lura, D. P. Bentz, D. A. Lange, and T. Israel, "Pumice Aggregates for Internal Water Curing by," *Natl. Inst. Stand. Technol.*, pp. 137–151, 2004.
- [24] M. R. Geiker, D. P. Bentz, and O. M. Jensen, "Mitigating autogenous shrinkage by internal curing.," *High-Performance Structural Lightweight Concrete, American*

- Concrete Institute Special Publication 218*, pp. 143–154, 2004.
- [25] D. P. Bentz, P. Lura, and J. W. Roberts, “Mixture proportioning for internal curing,” *Concr. Int.*, vol. 27, no. 2, pp. 35–40, 2005.
- [26] American Society for testing and materials, *Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete 1*, vol. i, no. c. 2013, pp. 1–8.
- [27] D. P. Bentz, “Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 5, pp. 285–289, 2009.
- [28] F. Li, Y. Yuan, and C. Q. Li, “Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 10, pp. 3878–3885, 2011.
- [29] ACI Prestressed Concrete Committee 423, “Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons,” 2006.
- [30] T. Y. Lin, *Diseño de estructuras de concreto preesforzado*. Mexico DF: Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., 1984.
- [31] J. Murcia, A. Agudo de Cea, and A. R. Mari, *Hormigón armado y pretensado*. Barcelona: Ediciones UPC, 1993.
- [32] B. C. Gerwick, “Ocean Structures of Prestressed Concrete,” *PCI Journal*, no. June, pp. 10–23, 1970.
- [33] E. G. Nawy, *Prestressed Concrete: a fundamental approach*. New York: Prentice Hall, 2009.
- [34] Japan Society of Civil Engineers JSCE, “Standard Specification for Concrete Structures ‘Design,’” 2007.
- [35] N. R. Guptill, D. J. Green, G. R. Mass, P. E. Reinhart, and J. B. Tucker, “ACI 304R-00 Guide for Measuring , Mixing , Transporting , and Placing Concrete Reported by ACI Committee 304,” p. 22.
- [36] Japan Society of Civil Engineers JSCE, *Standard Specifications for Concrete Structures*, no. 15. 2007.
- [37] DURAR, *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado*. 1997.
- [38] S. Feliu and A. C., “Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras,” Madrid, 1989.
- [39] F. Duprat, N. T. Vu, and A. Sellier, “Accelerated carbonation tests for the

probabilistic prediction of the durability of concrete structures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 597–605, 2014.

- [40] K. Tuutti, “Corrosion of steel in concrete,” Stockholm, 1982.
- [41] E. I. Moreno and R. G. Solís, “Durabilidad del concreto,” Mérida, 2007.
- [42] M. G. Fontana, *Corrosion Engineering*, Third Edit. Mc Graw-Hill, 1967.
- [43] R. Raichev, L. Veleva, and B. Valdez, *Corrosión de metales y degradación de materiales*. Mexicali: CIVESTAV Mérida, UABC, 2009.
- [44] S. M. Tarr and J. A. Farny, *Concrete Floors on Ground*, Fourth Edi. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2008.
- [45] S. H. Kosmatka and M. L. Wilson, *Design and Control of Concrete Mixtures*, 15th editi. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2011.
- [46] M. Lopez, “Curado Interno en Hormigones de Alto Desempeño-un nuevo paradigma.,” *Rev. Ing. Construcción*, vol. 20, no. 2, pp. 117–126, 2005.
- [47] J. Ries and American Society for testing and materials, “Internal Curing,” 2011. [Online]. Available: [http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND11/c0921\\_spnd11.html](http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND11/c0921_spnd11.html).
- [48] J. J. Flores, E. J. Escala, and R. Uribe, “Curado Interno-Una estrategia muy eficaz,” 2009. [Online]. Available: <http://www.imcyc.com/ct2009/jun09/especial.htm>.
- [49] T. A. Holm and W. T. Bremner, “State of the Art Report on High Strength, High Durability Structural Low-Density Concrete for Applications. Severe Marine Environments,” Vicksburg, MS., 2000.
- [50] ACI Committee 213, “Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete,” 2003.
- [51] M. López, K. E. Kurtis, and L. F. Kahn, “The Use of Saturated Lightweight Coarse Aggregate Decreases Long-Term Deformations of High Performance Lightweight Concrete,” in *7th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, 2006.
- [52] S. Weber and H. W. Reinhardt, “A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous Curing.,” *Adv. Cem. Based Mater.*, vol. 6, no. 2, pp. 59–68, 1997.
- [53] O. M. Jensen and P. F. Hansen, “Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 6, pp. 973–978, Jun. 2002.
- [54] American Society for testing and materials, *ASTM C188 Standard Test Method for*

*Density of Hydraulic Cement*. 2009.

- [55] American Society for testing and materials, *ASTM C128 Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. 2010.
- [56] American Society for testing and materials, *ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. 2010.
- [57] American Society for testing and materials, *ASTM C1761 Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete*. 2012.
- [58] American Society for testing and materials, *ASTM C938 Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate*. 2002.
- [59] American Society for testing and materials, *ASTM C185 Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar*. 2008.
- [60] American Society for testing and materials, *ASTM C230 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. 2008.
- [61] American Society for testing and materials, *ASTM C939 Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*. 2002.
- [62] American Society for testing and materials, *ASTM C953 Standard Test Method for Time of Setting of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*. 2006.
- [63] J. K. Campos Dimas, “Desarrollo de morteros ligeros base cemento portland con propiedades térmicas optimizadas mediante la incorporación de un micro co-polímero.,” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014.
- [64] American Society for testing and materials, *ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars ( Using 2-in . or [ 50-mm ] Cube Specimens )*. 2010.
- [65] American Society for testing and materials, *ASTM C942 Standard Test Method for Compressive Strength of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*. 2010.
- [66] I. H. Musa Albarwary and J. H. Haido, “Bond Strength of Concrete With the Reinforcement Bars Polluted With Oil,” *Eur. Sci. J.*, vol. 9, no. 6, pp. 255–272, 2013.
- [67] American Society for testing and materials, *ASTM C1698 Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*. 2014.
- [68] J. P. Broomfield, *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and*

- repair.*, Second edi. London: Taylor and Francis, 2007.
- [69] American Society for testing and materials, *ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. 1999.
- [70] American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO TP95 Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. 2013.
- [71] American Society for testing and materials, *ASTM C1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride*. 2008.
- [72] American Society for testing and materials, *ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement*. 2007.
- [73] F. Dalas, S. Pourchet, D. Rinaldi, A. Nonat, S. Sabio, and M. Mosquet, "Modification of the rate of formation and surface area of ettringite by polycarboxylate ether superplasticizers during early C3A–CaSO<sub>4</sub> hydration," *Cem. Concr. Res.*, vol. 69, pp. 105–113, Mar. 2015.
- [74] R. Talero, L. Trusilewicz, A. Delgado, C. Pedrajas, R. Lannegrand, V. Rahhal, R. Mejía, S. Delvasto, and F. A. Ramírez, "Comparative and semi-quantitative XRD analysis of Friedel's salt originating from pozzolan and Portland cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2370–2380, May 2011.
- [75] P.-C. Aïtcin, A. Bentur, and S. Mindess, *Binders for durable and sustainable concrete*, vol. 16. New York: Taylor and Francis, 2008.
- [76] A. Kostrzanowska-Siedlarz and J. Gołaszewski, "Rheological properties and the air content in fresh concrete for self compacting high performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 555–564, Sep. 2015.
- [77] H. F. Taylor, *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford, 1997.
- [78] P. Bost, M. Regnier, and M. Horgnies, "Comparison of the accelerating effect of various additions on the early hydration of Portland cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 290–296, 2016.
- [79] J. Hu, Z. Ge, and K. Wang, "Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 657–663, 2014.
- [80] D. P. Bentz, K. A. Snyder, M. A. Peltz, K. Obla, and H. Kim, "Viscosity Modifiers to Enhance Concrete Performance," *ACI Mater. J.*, vol. 110, no. 5, pp. 495–502, 2013.

- [81] L.-S. Pan, X.-Q. Qiu, Y.-X. Pang, and D.-J. Yang, "Effect of water-reducing chemical admixtures on early hydration of cement," *Adv. Cem. Res.*, vol. 20, no. 3, pp. 93–100, Jul. 2008.
- [82] Q. Xu, J. Hu, J. M. Ruiz, K. Wang, and Z. Ge, "Isothermal calorimetry tests and modeling of cement hydration parameters," *Thermochim. Acta*, vol. 499, no. 1–2, pp. 91–99, 2010.
- [83] Q. Xu, J. M. Ruiz, J. Hu, K. Wang, and R. O. Rasmussen, "Modeling hydration properties and temperature developments of early-age concrete pavement using calorimetry tests," *Thermochim. Acta*, vol. 512, no. 1–2, pp. 76–85, 2011.
- [84] R. P. Salvador, S. H. P. Cavalaro, I. Segura, A. D. Figueiredo, and J. Pérez, "Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 386–398, 2016.
- [85] A. Kumar, G. Sant, C. Patapy, C. Gianocca, and K. L. Scrivener, "The influence of sodium and potassium hydroxide on alite hydration: Experiments and simulations," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 11, pp. 1513–1523, Nov. 2012.
- [86] S. A. Greenberg and L. E. Copeland, "THE THERMODYNAMIC FUNCTIONS FOR THE SOLUTION OF CALCIUM HYDROXIDE IN WATER," *J. Phys. Chem.*, vol. 64, no. 8, pp. 1057–1059, Aug. 1960.
- [87] D. P. Bentz, T. Barrett, I. De la Varga, and W. J. Weiss, "Relating compressive strength to heat release in mortars," *Adv. Civ. Eng. Mater.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2012.
- [88] D. Lootens and D. P. Bentz, "On the relation of setting and early-age strength development to porosity and hydration in cement-based materials," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 68, pp. 9–14, 2016.
- [89] L. Frølich, L. Wadsö, and P. Sandberg, "Using isothermal calorimetry to predict one day mortar strengths," *Cem. Concr. Res.*, vol. 88, pp. 108–113, 2016.
- [90] H. J. Chen, S. S. Huang, C. W. Tang, M. A. Malek, and L. W. Ean, "Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes: A construction site study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 1063–1070, 2012.
- [91] N. Rebolledo and C. Andrade, "Corrosion rate of concrete made wuth different binders and exposed for 20 years in natural sea water," in *Corrosion and Metallurgy*, 2008.



- [92] J. M. Mendoza-Rangel, "Vida de servicio de estructuras de concreto reforzado influenciadas por el cambio climático global en ambiente tropical marino," Centro de investigación y estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- [93] I. L. H. Hansson and C. M. Hansson, "Electrical resistivity measurements of Portland cement based materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 13, no. 5, pp. 675–683, 1983.
- [94] B. Dong, J. Zhang, Y. Wang, G. Fang, Y. Liu, and F. Xing, "Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 119, pp. 16–20, 2016.
- [95] R. A. Medeiros-Junior and M. G. Lima, "Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 107, pp. 11–16, 2016.
- [96] G. E. Monfore, "The Electrical Resistivity of Concrete," *J. PCA Res. Dev. Lab.*, vol. 10, no. 2, pp. 35–48, 1968.
- [97] P. Dinakar, K. G. Babu, and M. Santhanam, "Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 10, pp. 880–886, 2008.
- [98] JNL Concrete international, "Ternary blends for controlling cost and carbon content," no. August, 2013.
- [99] T. Rupnow and P. Icenogle, "Surface Resistivity Measurements Evaluated as Alternative to Rapid Chloride Permeability Test for Quality Assurance and Acceptance," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2290, pp. 30–37, 2012.