



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA INCORPORACION DE MACROFIBRAS DE  
POLIPROPILENO (PP) EN LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE ION  
CLORURO EN HORMIGONES MARÍTIMOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

KARLA NATHALIE ELORZA RIVERA

PROFESOR GUÍA:

FEDERICO DELFÍN ARIZTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

HUGO BAESLER CORREA

MIGUEL ANGEL GONZÁLEZ TALEP

SANTIAGO DE CHILE

2015

# RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE: Ingeniera Civil

POR: Karla Elorza Rivera

FECHA: 16 de noviembre de 2015

PROFESOR GUÍA: Federico Delfín Ariztía.

## ESTUDIO DEL EFECTO DE LA INCORPORACION DE MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO (PP) EN LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE ION CLORURO EN HORMIGONES MARÍTIMOS

La vida útil de las estructuras de hormigón armado expuestas al ambiente marino se ve fuertemente afectada por deficiencias en la calidad y espesor del recubrimiento de hormigón para los efectos de cumplir su función de protección contra la corrosión de la armadura.

Actualmente, la incorporación de fibras de polipropileno ha resultado eficiente para el control de la fisuración en elementos expuestos a condiciones de alta evaporación, en el período inicial de curado. Se observa sin embargo, que con respecto al desempeño de este tipo de hormigón frente a la penetración de agua y sales solubles, que afectan la durabilidad de la estructura, no se cuenta con información específica, particularmente en cuanto a su resistencia a la penetración de iones cloruro.

El objetivo del presente trabajo de título es investigar si la incorporación de fibras de polipropileno al hormigón estructural puede afectar, en alguna medida, el grado de protección contra la penetración de ion cloruro del hormigón de recubrimiento y el riesgo de corrosión de la armadura, tanto para el caso de un hormigón convencional (H30), como para el hormigón marino.

Se desarrolló un programa experimental que permitiera evaluar la resistencia a la penetración de ion cloruro de hormigones con distintas matrices aglomerantes, incluyendo o no fibras de polipropileno, utilizando el método de ensayo de la norma ASTM C1202. Las variables consideradas para el hormigón fueron la relación A/C y el contenido de adición de microsilíce (MS). Además, para evaluar la influencia de la fisuración, normalmente existente en el hormigón, las probetas fueron sometidas a distintos niveles de carga (% de la carga de rotura) antes de proceder al ensayo de permeabilidad al ion cloruro.

Los resultados permitieron verificar que, para el caso del hormigón convencional (A/C=0.55, sin MS), la incorporación de fibras en dosis de 3 kg/m<sup>3</sup>, aumentaba la permeabilidad a cloruros tanto en probetas sin fisuración inducida como en aquellas sometidas a niveles de carga de 20% y 40% de la carga de rotura, previo al ensayo de penetración de cloruros. Por otra parte, en el caso del hormigón marino (A/C=0.42 más 5% en peso de cemento de MS), la incorporación de igual dosis de fibra no alteraba significativamente el comportamiento del hormigón en el ensayo de penetración de cloruros, manteniéndose la calificación de "muy baja" penetración tanto para las probetas sin fisuración previa como para el caso de las probetas sometidas a niveles de 20% y 40% de la carga de rotura.

La mayor permeabilidad a cloruros que se origina por la incorporación de macro fibras de PP al hormigón se explicaría por la presencia de una mayor porosidad asociada a la zona de interfaz fibra/matriz que facilitaría el transporte de iones a través de la matriz. La reacción puzolánica por la incorporación de MS permitiría restituir la condición original de permeabilidad de la matriz sin fibras.

## Dedicatoria

Al amor de mis padres, abuelos y hermanos,  
por su apoyo incondicional durante estos años.

A Enzo, por su compañía en este camino.

## Agradecimientos

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a todos los que formaron parte de este trabajo.

En primer lugar, a los funcionarios de los distintos laboratorios de IDIEM de la Universidad de Chile que aportaron a este estudio, en particular a Daniel Vergara, Marcela Álamos y Ricardo Bascuñán, quienes trabajan en el laboratorio químico y compartieron sus conocimientos, equipos y dependencias para realizar las pruebas de penetrabilidad al ion cloruro, a Pablo Villar y Francisco Agüero, quienes ayudaron en la confección de los hormigones de prueba y las mezclas finales. A Patricio Acosta, Diego Quintana y Gregorio Arévalo, quienes aportaron ensayando a compresión las probetas, y luego en el proceso de aserrado y obtención de discos para el estudio. Y a cada uno de los que sin participar activamente, aportaron mostrando interés en el trabajo, una sonrisa de apoyo y disposición a ayudar. A Smyrna Hermosilla, quien con una llamada a sus contactos devolvió mis ganas de hacer la memoria luego de mucho tiempo tratando de conseguir materiales.

Además aprovecho la instancia para agradecer a las empresas del rubro de la construcción de este país, ya que con su aporte me permitieron realizar las mezclas para llevar a cabo el trabajo experimental. Las empresas Melón Hormigones S.A., Productos Cave, Normet Chile, Sika Chile, quienes desinteresadamente aportaron con los distintos componentes de cada mezcla.

A Paz Urzúa, quien me acompañó a retirar las fibras de polipropileno y un largo viaje se hizo muy ameno.

A todas las personas que conocí en la Universidad y que aportaron en mi proceso de formación, cada palabra de aliento, sonrisa, saludo, mirada, conversación de pasillo, forma parte de mi esencia. A mis amigos Paola Bustos, Diego Hurtado, Camila San Miguel, Manuel García, Francisco Flores, Ignacio Manríquez. A los que no nombro pero que de todas formas los tengo presentes. Al equipo de futbolito de la facultad, que me dio tantas alegrías y hasta el día de hoy me expresa cariño.

A mis padres Valeska y Nelson, por su apoyo incondicional, confianza y respeto. Gracias por enseñarme que todo se puede lograr, y por darme las herramientas para ser feliz.

Y finalmente al profesor Federico Delfín, quién fue mi guía en cada aspecto de la memoria, me acompañó y dirigió durante este tiempo, siempre con gran compromiso y disponibilidad.

A todos y cada uno de ustedes, muchas gracias.

# TABLA DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....  | 11 |
| 1.1 OBJETIVOS.....   | 12 |
| 1.1.1 Objetivos Generales.....   | 12 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos.....   | 12 |
| 1.1.3 Resultados esperados. ....   | 13 |
| CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....   | 14 |
| 2.1 DURABILIDAD DEL HORMIGÓN .....   | 14 |
| 2.1.1 Ambiente marino.....   | 14 |
| 2.2 EFECTOS DEL ION CLORURO EN EL HORMIGÓN .....   | 15 |
| 2.2.1 Conceptos básicos del proceso de corrosión.....  | 15 |
| 2.2.2 Propiedades del concreto en la zona de recubrimiento .....                                       | 15 |
| 2.2.3 Mecanismos de transporte del ion cloruro en el hormigón.....                                     | 15 |
| 2.2.4 Análisis teórico del fenómeno de difusión a través de las leyes de Fick .....                    | 18 |
| 2.2.5 Influencia de las microfisuras para el transporte del ion cloruro en el hormigón. ....           | 20 |
| 2.3 MEDICIÓN DE LA PENETRABILIDAD AL ION CLORURO POR MIGRACIÓN CON EL MÉTODO ASTM C1202.....           | 21 |
| 2.4 USO DE MICROSÍLICE PARA MEJORAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO ..... | 23 |
| 2.5 USO DE MACRO FIBRAS DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN .....  | 24 |
| CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....  | 25 |
| 3.1 VARIABLES A ESTUDIAR .....   | 25 |
| 3.1.1 Tipo de hormigón (matriz aglomerante).....   | 25 |
| 3.1.2 Presencia de fibras .....  | 25 |
| 3.1.3 Porcentaje de fisuras. ....  | 26 |
| 3.2 PROGRAMA DE ENSAYOS .....  | 27 |
| 3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS .....   | 27 |
| 3.3.1 Obtención de discos para ensayo de penetración de cloruros .....                                 | 27 |
| 3.3.2 Ensayo de penetración de cloruros (ASTM C1202).....  | 27 |
| CAPITULO 4. DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL.....   | 29 |
| 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....  | 29 |
| 4.1.1 Matriz aglomerante.....  | 29 |
| 4.2 DOSIFICACIONES Y CONFECCIÓN DEL HORMIGÓN.....  | 34 |
| 4.3 PREPARACIÓN PARA EL ENSAYO DE PENETRACIÓN DE ION CLORURO (ASTM C1202). ....                        | 37 |
| 4.3.1 Esfuerzo de compresión para generar fisuras.....   | 37 |
| 4.3.2 Corte de probetas. Obtención de discos .....   | 37 |
| 4.3.3 Preparación para el ensayo de penetración de ion cloruro (ASTM C1202)..                          | 38 |
| 4.3.4 Ensayo ASTM C1202 .....  | 38 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3.5 Microscopía electrónica de las probetas ensayadas .....            | 39 |
| CAPITULO 5. RESULTADOS.....  | 41 |
| 5.1 CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ESTUDIADOS. ....                       | 41 |
| 5.1.1 Trabajabilidad del hormigón.....                                   | 41 |
| 5.1.2 Resultados ensayo a compresión .....                               | 42 |
| 5.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO.....  | 44 |
| 5.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO .....                             | 44 |
| CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....                                  | 49 |
| 6.1 ENSAYO ASTM C1202 .....  | 49 |
| 6.1.1 Influencia del tipo de hormigón. ....                              | 50 |
| 6.1.2 Influencia de la incorporación de macro fibras en el hormigón..... | 51 |
| 6.1.3 Influencia de la carga a la cual fue sometida la probeta.....      | 52 |
| 6.2 ANÁLISIS MICROSCÓPICO .....  | 52 |
| CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                         | 53 |
| 7.1 CONCLUSIONES.....  | 53 |
| 7.2 RECOMENDACIONES.....   | 54 |
| CAPITULO 8. BIBLIOGRAFÍA .....   | 55 |
| CAPITULO 9. ANEXOS .....   | 59 |
| 9.1 RESULTADOS ENSAYO ASTM C1202.....                                    | 59 |
| 9.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA .....  | 71 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE PENETRABILIDAD DEL ION CLORURO EN EL HORMIGÓN .....   | 22 |
| TABLA 3.1 NOMENCLATURA HORMIGÓN.....   | 26 |
| TABLA 4.1 PROPIEDADES DEL CEMENTO INDICADAS POR EL FABRICANTE .....  | 29 |
| TABLA 4.2 PROPIEDADES DE LA MICROSÍLICE UTILIZADA: .....   | 30 |
| TABLA 4.3 RESULTADO ANÁLISIS FÍSICO DE ÁRIDOS.....   | 31 |
| TABLA 4.4 GRANULOMETRÍA DE ÁRIDOS.....   | 31 |
| TABLA 4.5 PROPIEDADES DE LAS MACRO FIBRAS .....  | 33 |
| TABLA 4.6 PROPIEDADES DEL ADITIVO .....  | 33 |
| TABLA 4.7 DOSIFICACIONES DE HORMIGONES ESTUDIADOS .....  | 34 |
| TABLA 4.8 CLASIFICACIÓN DE PENETRABILIDAD AL ION CLORURO DE ACUERDO A LA ASTM<br>C1202.....  | 39 |
| TABLA 5.1 DOCILIDAD DEL HORMIGÓN .....   | 41 |
| TABLA 5.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE DISEÑO.....   | 42 |
| TABLA 5.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN CILINDROS .....  | 43 |
| TABLA 5.4 RESULTADOS ENSAYO ASTM C1202.....  | 44 |
| TABLA 6.1 COMPORTAMIENTO EN PENETRABILIDAD A ION CL DE LOS HORMIGONES<br>ESTUDIADOS PARA DISTINTOS NIVELES DE DAÑO IMPUESTOS. .... | 51 |
| TABLA 6.2 COMPORTAMIENTO EN PENETRABILIDAD A ION CL DE LOS HORMIGONES<br>ESTUDIADOS PARA DISTINTOS NIVELES DE DAÑO IMPUESTOS. .... | 51 |
| TABLA 9.1 ENSAYO PROBETA A HC0 .....   | 59 |
| TABLA 9.2 ENSAYO PROBETA A HC20.....   | 59 |
| TABLA 9.3 ENSAYO PROBETA A HC40.....   | 60 |
| TABLA 9.4 ENSAYO PROBETA B HC0 .....   | 60 |
| TABLA 9.5 ENSAYO PROBETA B HC20.....   | 61 |
| TABLA 9.6 ENSAYO PROBETA B HC40.....   | 61 |
| TABLA 9.7 ENSAYO PROBETA A HM0.....  | 62 |
| TABLA 9.8 ENSAYO PROBETA A HM20 .....  | 62 |
| TABLA 9.9 ENSAYO PROBETA A HM40 .....  | 63 |
| TABLA 9.10 ENSAYO PROBETA B HM0 .....  | 63 |
| TABLA 9.11 ENSAYO PROBETA B HM20 .....   | 64 |
| TABLA 9.12 ENSAYO PROBETA B HM40 .....   | 64 |
| TABLA 9.13 ENSAYO PROBETA A HCF0 .....   | 65 |
| TABLA 9.14 ENSAYO PROBETA A HCF20 .....  | 65 |
| TABLA 9.15 ENSAYO PROBETA A HCF40 .....  | 66 |
| TABLA 9.16 ENSAYO PROBETA B HCF0.....  | 66 |
| TABLA 9.17 ENSAYO PROBETA B HCF20 .....  | 67 |
| TABLA 9.18 ENSAYO PROBETA B HCF40 .....  | 67 |
| TABLA 9.19 ENSAYO PROBETA A HMF0.....  | 68 |
| TABLA 9.20 ENSAYO PROBETA A HMF20 .....  | 68 |
| TABLA 9.21 ENSAYO PROBETA A HMF40 .....  | 69 |
| TABLA 9.22 ENSAYO PROBETA B HMF0.....  | 69 |
| TABLA 9.23 ENSAYO PROBETA B HMF20 .....  | 70 |

TABLA 9.24 ENSAYO PROBETA B HMF40 .....70

## INDICE DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| ILUSTRACIÓN 2.1 INFLUENCIA DE LA POROSIDAD CAPILAR SOBRE LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN. ....  | 16 |
| ILUSTRACIÓN 2.2 INFLUENCIA DE LA RELACIÓN A/C SOBRE LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN .....   | 17 |
| ILUSTRACIÓN 2.3 PROCESO DE DETERIORO DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO  | 21 |
| ILUSTRACIÓN 2.4 MONTAJE EXPERIMENTAL ENSAYO ASTM C1202 .....  | 22 |
| ILUSTRACIÓN 3.1 CÁMARA DE SECADO Y MANÓMETRO .....  | 27 |
| ILUSTRACIÓN 4.1 MACRO FIBRA MONOFILAMENTO .....   | 33 |
| ILUSTRACIÓN 4.2 ENSAYO DE ASENTAMIENTO DE CONO HC .....   | 35 |
| ILUSTRACIÓN 4.3 HORMIGÓN DE PRUEBA HC .....   | 36 |
| ILUSTRACIÓN 4.4 OBTENCIÓN DE DISCOS PARA ENSAYO ASTM C1202. ....  | 37 |
| ILUSTRACIÓN 4.5 MONTAJE DE ENSAYO ASTM C1202 .....  | 38 |
| ILUSTRACIÓN 4.6 PRISMAS PARA ANÁLISIS MICROSCÓPICO. HORMIGÓN CONVENCIONAL (1), HORMIGÓN MARÍTIMO (2), HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRA (3), HORMIGÓN MARÍTIMO CON FIBRA (4). ....                      | 40 |
| ILUSTRACIÓN 5.1 MUESTRA CORRESPONDIENTE AL NÚCLEO DE PROBETA HC20.....  | 45 |
| ILUSTRACIÓN 5.2 ACERCAMIENTO INTERFAZ ÁRIDO/MATRIZ NÚCLEO PROBETA HC20.....   | 45 |
| ILUSTRACIÓN 5.3 MUESTRA CORRESPONDIENTE AL NÚCLEO DE PROBETA HM20 .....   | 46 |
| ILUSTRACIÓN 5.4 ACERCAMIENTO INTERFAZ ÁRIDO/MATRIZ NÚCLEO PROBETA HM20 ....   | 46 |
| ILUSTRACIÓN 5.5 MUESTRA CORRESPONDIENTE AL NÚCLEO DE PROBETA HCF20 .....  | 47 |
| ILUSTRACIÓN 5.6 ACERCAMIENTO INTERFAZ ÁRIDO/MATRIZ NÚCLEO PROBETA HCF20 ...   | 47 |
| ILUSTRACIÓN 5.7 MUESTRA CORRESPONDIENTE AL NÚCLEO DE PROBETA HMF20.....   | 48 |
| ILUSTRACIÓN 5.8 ACERCAMIENTO INTERFAZ ÁRIDO/MATRIZ NÚCLEO PROBETA HMF20...  | 48 |
| ILUSTRACIÓN 9.1 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HC20. FOTOGRAFÍA N°1. ....   | 71 |
| ILUSTRACIÓN 9.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HC20. FOTOGRAFÍA N°2 SE REALIZA ZOOM A LA INTERFAZ ÁRIDO/MATRIZ. SE APRECIA POROSIDAD CAPILAR CON MAYOR DETALLE, MICROFISURACIÓN, VACÍOS DE AIRE. .... | 72 |
| ILUSTRACIÓN 9.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HC20. FOTOGRAFÍA N°3. SE REALIZA ZOOM A LA INTERFAZ ÁRIDO/MATRIZ. SE APRECIA POROSIDAD CAPILAR ALTA, MICROFISURACIÓN. ....                             | 73 |
| ILUSTRACIÓN 9.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HC20. FOTOGRAFÍA N°4. ....   | 74 |
| ILUSTRACIÓN 9.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HC20. FOTOGRAFÍA N°5. ....   | 75 |
| ILUSTRACIÓN 9.6 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HM20. FOTOGRAFÍA N°1. ....   | 76 |
| ILUSTRACIÓN 9.7 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HM20. FOTOGRAFÍA N°2. ....   | 77 |
| ILUSTRACIÓN 9.8 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HCF20. FOTOGRAFÍA N°1. ....  | 78 |
| ILUSTRACIÓN 9.9 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HCF20. FOTOGRAFÍA N°2. ....  | 79 |
| ILUSTRACIÓN 9.10 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HCF20. FOTOGRAFÍA N°3. ....   | 80 |
| ILUSTRACIÓN 9.11 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HCF20. FOTOGRAFÍA N°4. ....   | 81 |
| ILUSTRACIÓN 9.12 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HMF20. FOTOGRAFÍA N°1. ....   | 82 |
| ILUSTRACIÓN 9.13 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HMF20. FOTOGRAFÍA N°2. ....   | 83 |
| ILUSTRACIÓN 9.14 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HMF20. FOTOGRAFÍA N°3. ....   | 84 |
| ILUSTRACIÓN 9.15 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HMF20. FOTOGRAFÍA N°4. ....   | 85 |

ILUSTRACIÓN 9.16 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA NÚCLEO HMF20. FOTOGRAFÍA N°5.....86

## **CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.**

La durabilidad del hormigón expuesto a ambiente marino depende fundamentalmente del espesor y calidad del recubrimiento que poseen las barras de acero en su interior. La combinación del ataque del ion cloruro sumado a condiciones de carga de la estructura, generan micro y macro fisuras, las cuales modifican las propiedades de transporte del hormigón de la etapa de diseño.

Como durabilidad se entiende la capacidad de las estructuras de soportar las condiciones físicas y mecánicas para las cuales han sido diseñadas [Ref. 1].

Esta durabilidad se ve afectada por distintos factores, entre ellos la falta de prolijidad en la selección de materiales, omisión de factores ambientales en la etapa de diseño, o errores en la etapa de construcción, como por ejemplo no aplicar un curado apropiado del hormigón colocado.

La necesidad de disponer información que permita estimar la vida útil para la infraestructura portuaria, proyectada conforme a los estándares y a las metodologías de diseño actuales, constituye una de las motivaciones del presente estudio.

El gran problema del ambiente marino, es la concentración de ion cloruro, que ataca la zona expuesta del hormigón, iniciando en el recubrimiento de los elementos de hormigón armado, lo que conlleva a estructuras dañadas tanto por agrietamiento como por pérdida de capacidad de diseño.

El acero dentro del hormigón se encuentra protegido por dos mecanismos; la protección física que infiere el espesor de recubrimiento, y el líquido que se encuentra en los poros del hormigón que actúa como electrolito y le da pasividad [Ref. 4].

La corrosión del acero comienza cuando la pasividad se pierde debido al ataque de sustancias agresivas que pueden provenir del interior del hormigón (materias primas) o exterior (ambientes agresivos o condiciones de servicio superiores a las de diseño).

La presencia de fisuras en la estructura permite el paso del ion cloruro, quitando esta barrera pasiva, dejando el acero sin protección y provocando

oxidación de la armadura, y con ello aumento de volumen del acero, generando agrietamiento y problemas de adherencia entre acero y hormigón.

Las fisuras se presentan en dos etapas; la primera etapa corresponde a la etapa de iniciación, en donde se crea la fisura, la cual es muy pequeña y de poca profundidad. Posteriormente, si no existe algún tipo de refuerzo, viene la etapa de propagación, en donde la fisura crece y permite el paso de agentes corrosivos que atacan las armaduras.

Actualmente, la tecnología del hormigón dispone de diversos aditivos para la obtención de hormigones de muy alta impermeabilidad, y de refuerzos en base a fibras sintéticas que permiten controlar la formación y propagación de fisuras en las superficies expuestas de vigas y losas.

En la literatura no se dispone de mayor información con respecto a la influencia de la adición de macro fibras de polipropileno en la penetrabilidad del hormigón al ion cloruro, por lo que se realizará una campaña experimental que permita resolver esta interrogante.

Para realizar la medición de la resistencia a la penetración de cloruros, existe un método acelerado, ASTM C1202, que consiste en someter una probeta de hormigón, dispuesta en solución salina, a un campo eléctrico que acelera el flujo de iones a través del espesor de la probeta. Se registra la cantidad de carga eléctrica que pasa en un periodo de 6 horas, para lo cual se toman medidas cada 30 minutos, y con ello se estima el nivel de conductividad de los distintos hormigones que son sometidos al ensayo, fabricados con diferentes composiciones.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos Generales.**

Estudiar el comportamiento de elementos de hormigón reforzados con macro fibras de polipropileno frente a la penetración del ion cloruro, bajo condiciones de servicio.

### **1.1.2 Objetivos Específicos.**

Estudiar el fenómeno de penetración del ion cloruro en hormigones marítimos variando la relación agua cemento (A/C) y adición de microsílíce (MS), afectando la porosidad del hormigón.

Estudiar la influencia del grado de fisuración del hormigón en la permeabilidad del cloruro bajo las condiciones del ensayo acelerado ASTM C1202.

### 1.1.3 Resultados esperados.

Se espera aportar información sobre posibles efectos negativos para la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, asociados a la incorporación de fibras de polipropileno como refuerzo y control de la fisuración, expuestas al ambiente marino.

## **CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.**

En este capítulo se realiza una revisión de los aspectos y características relevantes para la durabilidad del hormigón en ambiente marítimo.

### **2.1 Durabilidad del hormigón**

El proceso de fabricación del cemento portland involucra grandes emisiones de gases, los cuales contribuyen al efecto invernadero. Para poder situar a la industria del hormigón en una industria sustentable, es necesario cambiar las materias primas, por ejemplo sustituyendo parte del cemento portland por otros agregados como cenizas volantes o puzolanas naturales, esto con el fin de disminuir la fabricación de Clinker, materia prima principal del cemento portland, y comenzar a utilizar adiciones cementicias existentes, y de esta manera hacer más sustentable las estructuras construidas con este material, disminuyendo algunas patologías a las que se ven afectadas y extendiendo su vida útil.

La Guía para Durabilidad del Hormigón [Ref. 1], define durabilidad como "la capacidad de un hormigón para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Por lo tanto un hormigón durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente".

Entre las principales causas que provocan el deterioro del hormigón se encuentra la acción del ambiente en el cual la estructura desempeña sus funciones. Uno de los ambientes más agresivos para las estructuras de hormigón armado es el ambiente marino, por las razones que se mencionan a continuación.

#### **2.1.1 Ambiente marino**

El ambiente marino es reconocido como uno de los ambientes más agresivos para el hormigón. Factores químicos relacionados a la alta concentración de sales disueltas en el agua de mar, junto con factores geométricos y físicos relacionados con la fluctuación de la zona de mareas y la brisa marina, contribuyen a crear zonas de humedad y erosión, lo que se traduce en el deterioro de las estructuras expuestas a la influencia del mar.

Es requisito fundamental, en estos casos, contar con hormigones que tengan baja permeabilidad, para que el mínimo recubrimiento recomendado pueda proteger las armaduras que se encuentran al interior de la estructura, y no sufran riesgos de corrosión. Esto se obtiene utilizando hormigones con baja relación A/C y un proceso de curado adecuado. Además se debe tener

en cuenta que si se trata de estructuras portuarias, es muy probable que se trabaje con hormigones masivos, por lo que el calor de hidratación generará gradientes de temperatura dentro de los elementos estructurales, provocando fisuras que afectarán la permeabilidad.

## **2.2 Efectos del ion cloruro en el hormigón**

### **2.2.1 Conceptos básicos del proceso de corrosión**

La penetración del ion cloruro en el hormigón se ve afectada por la fisuración de la zona de recubrimiento o de la estructura de poros de la matriz. La corrosión del acero de refuerzo se origina cuando se tienen las condiciones para que el acero pierda la pasividad que le otorga el hormigón. Esta corrosión produce expansión volumétrica del acero, y con ello se producen fisuras, desprendimientos y pérdida de adherencia entre acero y hormigón, proceso que incrementa con el tiempo, debido que al aumentar las fisuras se expone mayor zona de armaduras.

### **2.2.2 Propiedades del concreto en la zona de recubrimiento**

La zona de recubrimiento de los elementos de hormigón armado se ve afectada por condiciones ambientales, como temperatura, humedad, brisa, entre otras. Una de las causas de penetración de cloruros en el hormigón son las fisuras, las cuales permiten el ingreso de iones más rápido que por difusión.

Las principales propiedades de la zona de recubrimiento que necesitan ser atendidas son difusión y permeabilidad.

Si existe humedad y oxígeno en cantidades necesarias, puede darse el fenómeno de corrosión de las armaduras dentro del hormigón. Tomando en consideración la baja resistencia a la tracción del material, y el carácter expansivo del óxido, comienzan a presentarse las primeras fisuras en el hormigón, permitiendo el ingreso de agentes agresivos a la estructura.

### **2.2.3 Mecanismos de transporte del ion cloruro en el hormigón**

#### **2.2.3.1 Permeabilidad.**

La permeabilidad se define como la capacidad de un fluido de pasar a través de un sólido bajo una determinada presión [Ref. 1].

La permeabilidad del hormigón al agua  $K$  [m/s], es posible determinarla para flujos estables, con la expresión de Darcy, como se muestra en la ecuación 2.1

$$\frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta H * A}{L} \quad \text{Ec 2.1}$$

Donde:

$Dq/dt$ : índice del flujo de agua.

A: área de la sección transversal de la muestra.

$\Delta H$ : gradiente de presión.

L: espesor de la muestra.

Este coeficiente de permeabilidad se ve influenciado por la porosidad capilar de la muestra, la cual responde a la relación agua/cemento (en adelante A/C), como se muestra en las ilustraciones 2.1 y 2.2

Ilustración 2.1 Influencia de la porosidad capilar sobre la permeabilidad del hormigón.

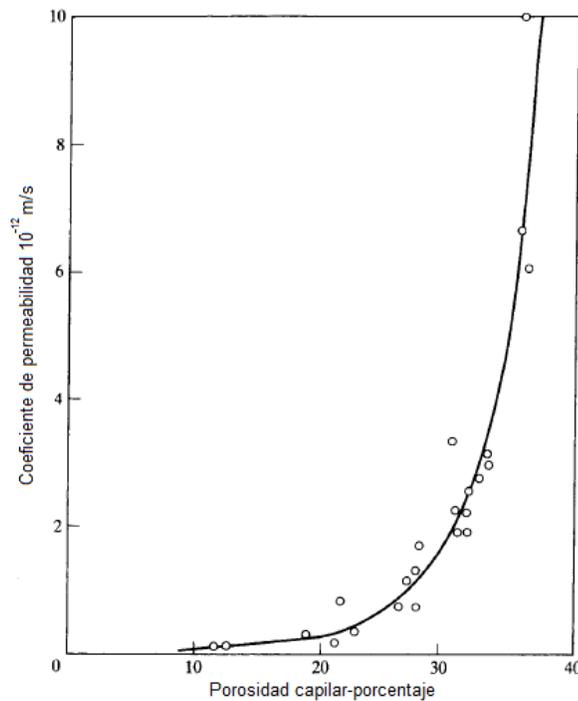
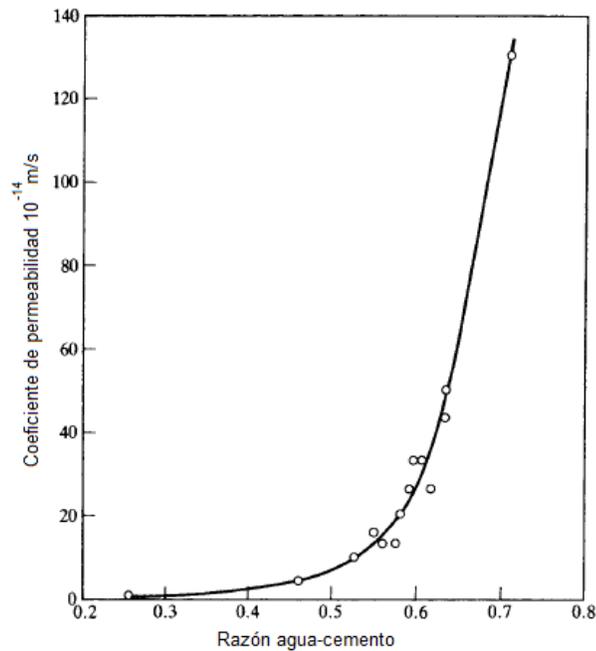


Ilustración 2.2 Influencia de la relación A/C sobre la permeabilidad del hormigón



### 2.2.3.2 Absorción

La absorción corresponde al transporte de líquidos producto de una tensión superficial actuando en los capilares, lo que causa que el fluido ingrese dentro del hormigón. Este fenómeno es conocido como succión capilar.

La velocidad con la que un líquido en contacto con el hormigón es absorbido o succionado se conoce como velocidad de absorción, dada por la masa del líquido absorbido por unidad de área, en función del tiempo de contacto  $t$

$$a = \frac{\Delta m}{Af(t^n)} \quad \text{Ec 2.2}$$

Donde:

$a$ : velocidad de absorción ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^n$ )

$\Delta m$ : líquido absorbido (g)

$A$ : área en contacto con agua ( $\text{m}^2$ )

$f(t^n)$ : función de tiempo (ej:  $\sqrt{t}$ , donde  $n= 1/2$ )

### 2.2.3.3 Difusión

La difusión corresponde a la transferencia de moléculas libres o iones en una solución, resultando en un flujo desde regiones de alta concentración de la sustancia difusiva a regiones con menor concentración. Este mecanismo ocurre sin la necesidad de que los poros se encuentren completamente saturados como en el caso del flujo bajo presión.

### 2.2.4 Análisis teórico del fenómeno de difusión a través de las leyes de Fick

Las leyes de Fick modelan migración de un material a través de otro.

Se considera un material donde la difusión ocurre en una dirección, bajo condiciones de presión y temperatura constantes. La transferencia de material ocurre de modo que el gradiente de concentración se reduce en búsqueda del equilibrio. La Primera Ley de Fick establece que el flujo de material por unidad de área que pasa en un tiempo determinado, es proporcional al gradiente de concentración, lo cual se expresa mediante la siguiente ecuación

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Ec (2.3)}$$

Donde

F es el flujo de material (cantidad/área/tiempo)

C es la concentración de la sustancia por unidad de volumen

x dirección en que ocurre la difusión

D es el coeficiente de difusión (área/tiempo).

Si se considera dos planos paralelos, separados entre sí por una distancia dx, el flujo a través del primer plano se puede describir como

$$F_1 = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Ec (2.4)}$$

El flujo a través del segundo plano será

$$F_2 = F_1 + \frac{\partial F_1}{\partial X} dx = -D \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{D \partial C}{\partial x} \right) \quad \text{Ec (2.5)}$$

Y la variación de la concentración con respecto al tiempo es

$$\frac{\partial C}{\partial t} = F_1 - F_2 = \frac{\partial}{\partial X} \left( D \frac{\partial C}{\partial X} \right) dx \quad \text{Ec (2.6)}$$

Con ello se obtiene

$$\frac{\partial F}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{D \partial C}{\partial X} \right) \quad \text{Ec (2.7)}$$

Se observa que la variación de flujo con la distancia es igual al opuesto aditivo de la variación de concentración respecto del tiempo, es decir,

$$\frac{\partial F}{\partial x} = - \frac{\partial C}{\partial t} \quad \text{Ec (2.8)}$$

De este modo se obtiene la segunda ley de Fick,

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial X} \left( D \frac{\partial C}{\partial X} \right) \quad \text{Ec (2.9)}$$

Si el coeficiente de difusión se considera constante e independiente de la concentración, la ecuación se puede reescribir como sigue:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ec (2.10)}$$

Donde la solución a la ecuación es la presentada en la siguiente ecuación.

$$C_{(x,t)} = C_i + (C_s - C_i) \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad \text{Ec (2.11)}$$

Donde

$C_{(x,t)}$  es la concentración de ión cloruro en la profundidad  $x$  y tiempo  $t$

$C_s$  es la concentración de ión cloruro en la superficie

$C_i$  es la concentración inicial de ión cloruro.

$D$  es la difusión del ión cloruro en el concreto

$erf$  es la función de error.

Las leyes de Fick son una aproximación para modelar el fenómeno de difusión, asumiendo un sistema no interactivo.

### 2.2.5 Influencia de las microfisuras para el transporte del ion cloruro en el hormigón.

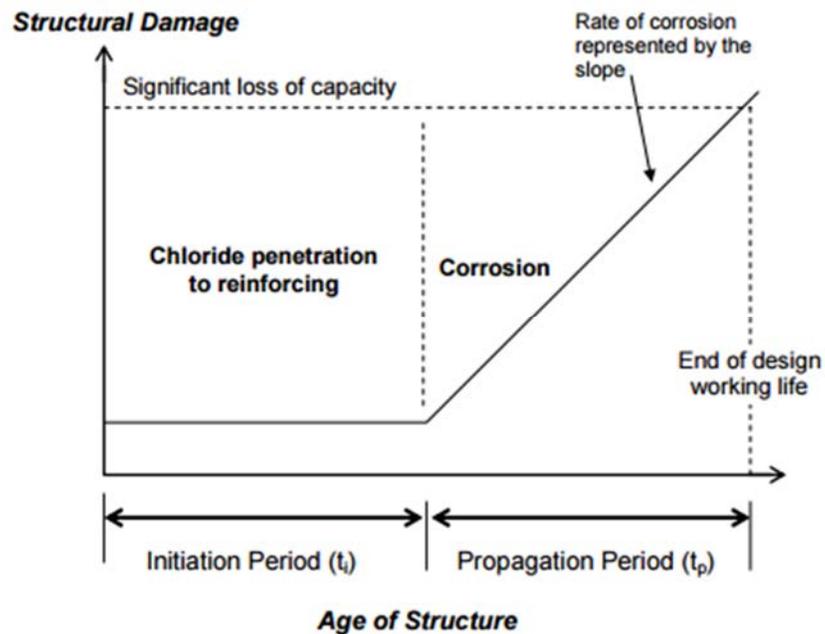
Las microfisuras en el hormigón pueden producirse por diferentes causas.

Entre las causas más importantes se encuentran las producidas por gradientes térmicos, retracción plástica, ciclos de hielo deshielo, reacciones álcali-agregado, producto de cargas externas, o como resultado de la interacción hormigón-medio ambiente.

Las fisuras son el primer medio para la corrosión, debido a que presentan un camino para los agentes externos hacia la armadura.

Existen dos fases, la primera es de iniciación de la fisura, en donde el ion cloruro comienza a atravesar al recubrimiento. La segunda es la propagación, en donde el daño de la estructura es proporcional al nivel de fisuras.

Ilustración 2.3 Proceso de deterioro de las estructuras de hormigón armado



### 2.3 Medición de la penetrabilidad al ion cloruro por migración con el método ASTM C1202

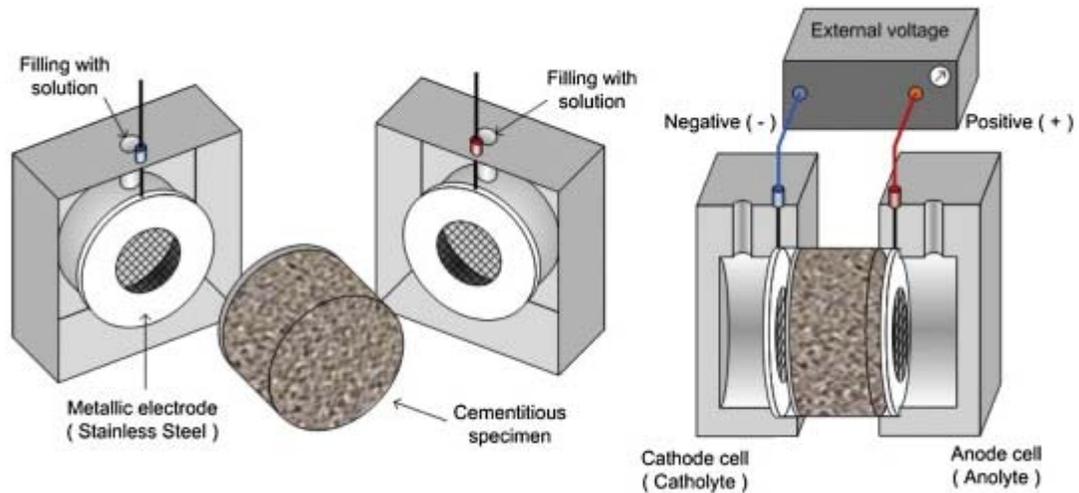
La propagación del ion cloruro en el hormigón para que sea representativa debe considerar el tiempo de exposición que tendrá la estructura a dichas condiciones; es decir el tiempo de servicio al cual fue proyectada. Este tiempo en la mayoría de los casos es muy largo, por lo que surge la necesidad de analizar métodos acelerados que permitan obtener valores de penetración del ion cloruro, coeficientes de difusión del hormigón entre otros.

El método utilizado en la presente investigación es el ASTM C1202, conocido como RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), de migración de ion cloruro por medio de traspaso de corriente eléctrica, que arroja la penetrabilidad del hormigón con respecto al ion cloruro, desarrollado por Whiting en 1981.

El ensayo consiste en posicionar ambas caras de un espécimen previamente condicionado y saturado en agua, de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, en celdas que contienen por un lado una solución de 3% NaCl y por otro una solución 0,3M NaOH. En la celda es aplicado un diferencial de potencial de 60 V DC, en el que la terminal negativa es conectada en la reserva con NaCl y la terminal positiva en la reserva con NaOH. Los iones cloruro migran hacia la terminal positiva forzados por el

diferencial de potencial. En la Ilustración 2.2 se muestra un esquema del montaje para el ensayo.

Ilustración 2.4 Montaje experimental ensayo ASTM C1202



El total de corriente que pasa por el espécimen en un total de 6 horas es registrado para clasificar al hormigón de acuerdo al criterio establecido en la norma, tal como muestra la Tabla 2.1. Cuanto mayor sea la carga medida (coulomb) mayor cantidad de iones hubo de transportarse, por lo tanto será catalogado con mayor penetrabilidad.

A continuación se presenta la clasificación dada por la norma ASTM C1202.

Tabla 2.1 Clasificación de penetrabilidad del ion cloruro en el hormigón

| Carga Pasada (coulomb) | Penetrabilidad al Ion Cloruro | Color asignado |
|------------------------|-------------------------------|----------------|
| >4000                  | Alta                          | Red            |
| 2000-4000              | Moderada                      | Purple         |
| 1000-2000              | Baja                          | Green          |
| 100-1000               | Muy Baja                      | Blue           |
| <100                   | Despreciable                  | Orange         |

## 2.4 Uso de microsílíce para mejorar la resistencia del hormigón a la penetración del ion cloruro

La microsílíce es un subproducto de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón de arco eléctrico, para la producción de aleaciones de silicio o ferrosilicio. El material es extremadamente fino, y es colectado a través de la filtración de los gases de escape del horno [Ref. 10].

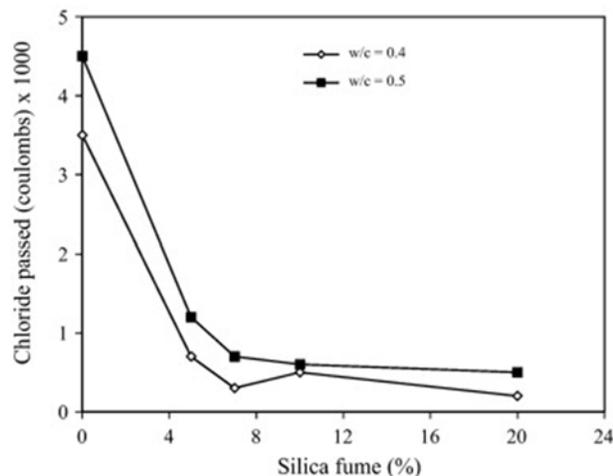
Su aporte en el hormigón es variado, mejora la resistencia a la compresión del hormigón, resistencia a la abrasión, densifica a corto plazo la microestructura del hormigón y con ello reduce la permeabilidad, y ayuda a la protección del acero de refuerzo.

Por las propiedades anteriormente mencionadas es que el uso de microsílíce es frecuentemente dosificado en estructuras marinas y puentes, y estructuras de hormigón con alto compromiso estructuras que requieran de altos valores de resistencia a compresión.

La partícula de microsílíce es aproximadamente 100 veces más pequeña que la partícula de cemento en promedio. Debido a este tamaño extremadamente fino y el alto contenido de sílice, es conocida como un material puzolánico.

Su uso implica mayor homogeneidad en la estructura de poros, debido a que reduce la formación de poros de mayor tamaño. Con esta reducción, la permeabilidad de la matriz se ve afectada, y la resistividad eléctrica de la matriz, como se distingue en el gráfico 2.1.

Gráfico 2.1 Influencia de la adición de microsílíce en la penetración del ion cloruro



## **2.5 Uso de macro fibras de polipropileno en el hormigón**

El uso de las macro fibras de polipropileno en el hormigón ha ganado fuerza debido a los beneficios que produce. Cuando las fibras son distribuidas de manera homogénea, mejora la tenacidad en el hormigón endurecido, aumenta resistencia al impacto, resistencia residual, y se reduce la aparición de fisuras [Ref. 15, 17].

En el hormigón en estado fresco, la adición de macro fibras afecta la consistencia, el contenido de aire, la bombeabilidad y la trabajabilidad de la mezcla [Ref. 16].

La diferente gama de aditivos existentes en la industria del hormigón, permite mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

A pesar de todas las investigaciones existentes del uso de macro fibras, no se tiene conocimiento al respecto de si afectan o no la permeabilidad del hormigón, en especial la penetrabilidad al ion cloruro, ese es uno de los puntos que motivan esta investigación.

Al agregar microsílíce se asegura una mejor distribución de las fibras de polipropileno en la matriz.

## CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1 Variables a estudiar

La durabilidad del hormigón armado se ve fuertemente afectada por la permeabilidad que lo caracteriza. Un hormigón muy permeable, tendrá las barras de acero expuestas a los agentes externos que se encuentran en el ambiente, debido a la permeabilidad del recubrimiento.

Entre las variables que influyen en la permeabilidad podemos encontrar la matriz aglomerante, razón agua matriz cementante, granulometría de la mezcla, % de finos, nivel de servicio de la estructura, entre otros.

Con el objetivo de obtener hormigones representativos, se consideraron las siguientes variables:

#### 3.1.1 Tipo de hormigón (matriz aglomerante)

Debido al frecuente uso del hormigón en el país y de acuerdo a las recomendaciones en las normas nacionales, se considera para el estudio distintas matrices aglomerantes, las cuales varían en relación A/C y adición de microsílíce.

- A/C 0.42 Y ADICIÓN DE 5% DE MICROSÍLICE (HM).
- A/C 0.55 SIN ADICIÓN DE MICROSÍLICE (HC).

Donde HM se refiere a hormigones marítimos, es decir hormigones frecuentemente utilizados en zonas costeras, y HC se refiere a hormigón convencional, utilizado en elementos convencionales que no se ven afectados por zonas costeras.

Los hormigones fabricados fueron caracterizados en su estado fresco a través de la docilidad medida por asentamiento de cono de Abrams y densidad fresca, mientras que en el estado endurecido se controló la densidad en estado endurecido y resistencia mecánica a los 28 días de acuerdo a la norma NCh 1037.Of 77.

Las caras de las probetas fueron tratadas con sierra dentada para obtener condiciones de perpendicularidad y planeidad aptas para el ensayo de determinación de la resistencia a compresión.

#### 3.1.2 Presencia de fibras

De tal modo de poder comparar los efectos de la adición de la fibra en el hormigón, se confeccionaron probetas patrón (sin adición de macro fibra) y

probetas con adición de macro fibra. La nomenclatura es la que se muestra en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Nomenclatura hormigón

| Nomenclatura | Detalle                         |
|--------------|---------------------------------|
| <b>HC</b>    | Hormigón convencional           |
| <b>HCF</b>   | Hormigón convencional con fibra |
| <b>HM</b>    | Hormigón marítimo               |
| <b>HMF</b>   | Hormigón marítimo con fibra     |

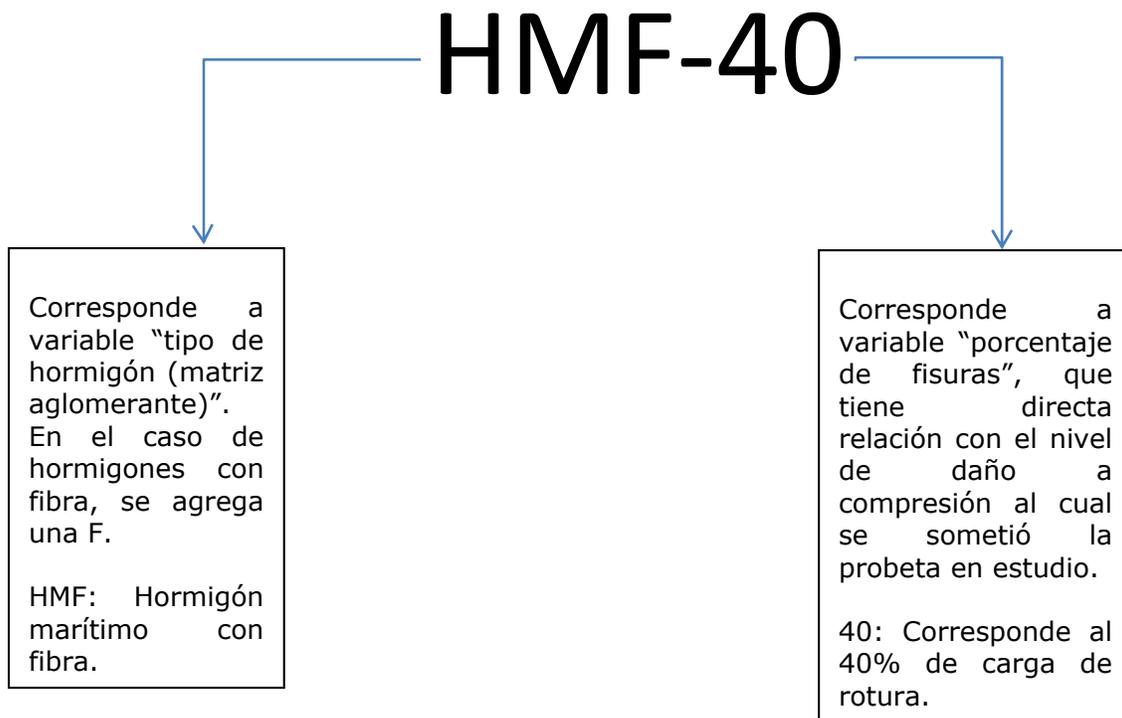
Se adoptó la siguiente condición de curado:

- CURADO EN AGUA. EN ESTE TIPO DE CURADO, LAS PROBETAS FUERON INTRODUCIDAS BAJO AGUA DURANTE 56 DÍAS (100% HUMEDAD Y  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  DE TEMPERATURA).

### 3.1.3 Porcentaje de fisuras.

Las condiciones de servicio del hormigón afectan en gran medida su comportamiento. Para lograr probetas bajo condiciones de servicio similares a las reales, las probetas se sometieron a distintos porcentajes de esfuerzo a compresión a la edad de 28 días.

La identificación utilizada para cada probeta se explica a continuación:



### 3.2 Programa de ensayos

Se confeccionaron probetas cilíndricas para analizar el efecto de la incorporación de macro fibras al hormigón en la penetración del ion cloruro.

La evaluación de la penetración a ion cloruro se realizó a partir del método ASTM C1202, en probetas de 56 días de edad.

### 3.3 Descripción de los ensayos

#### 3.3.1 Obtención de discos para ensayo de penetración de cloruros

A los 28 días de edad, las probetas fabricadas en moldes de PVC, de 19 cm de altura y 104 mm de diámetro, fueron sometidas a ensayo de compresión, de acuerdo a la norma NCh 1037.Of 77. Posterior al ensayo, se descartaron 45 mm de la esquina superior de la probeta, luego se obtuvieron dos discos de 50 mm de altura y 104 mm de diámetro, y se descartó el resto de la probeta (40 mm aproximadamente). Cada disco fue marcado con el número correspondiente al % de daño inferido con respecto a la resistencia a compresión, para luego ser sometidas al régimen de curado hasta completar la edad de ensayo ASTM C1202 (56 días desde la fecha de confección).

#### 3.3.2 Ensayo de penetración de cloruros (ASTM C1202)

La determinación de la penetración al ion cloruro en el hormigón se realizó según los requerimientos del método estandarizado ASTM C1202 [Ref. 3]. En la ilustración 3.1 se muestra el esquema y equipos necesarios para saturar las probetas en vacío.

Ilustración 3.1 Cámara de secado y manómetro



La saturación en vacío consiste en lo siguiente:

-Se sella el manto de los discos con resina epóxica, para evitar que las soluciones viajen a través del manto del disco. Se esperan 24 horas para la siguiente etapa.

-Se someten los discos a vacío de 50 mm de Hg durante tres horas, y luego, manteniendo la presión, se vierte agua destilada sobre la probeta y se deja en vacío una hora. Se deja en la misma agua las probetas durante 18+-2 horas y se pasa a la siguiente etapa.

Se monta el disco en la celda de difusión y se sella con silicona la unión entre el disco y la celda. Se agrega a las celdas las soluciones iónicas, una solución al 3% de NaCl, y otra con 0.3N de NaOH.

Se conectan las terminales a la fuente de poder, se enciende el equipo (fuente de poder) y se registra temperatura y caída de voltaje asegurando que el equipo entregue 60 V, que la variación no sea superior a 0,1 mV. Si la temperatura a lo largo del ensayo supera los 95°C, el ensayo se detiene inmediatamente.

Se repite el punto anterior cada 30 minutos durante 6 horas, y se registra la lectura del voltímetro.

La carga que pasa a través de la probeta se calcula con el método o regla de integración del trapecio como

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + \dots + 2 * I_{330} + I_{360}) \quad \text{Ec (3.1)}$$

Donde  $I_0$  es la corriente obtenida al momento de conectar el diferencial de potencial e  $I_t$  es la corriente medida a los t minutos de conectado el diferencial.

## CAPITULO 4. DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL.

La presente investigación se orientó hacia la evaluación de hormigones fabricados con distintas matrices aglomerantes con fibra, para caracterizar la resistencia a la penetración de iones cloruro, mediante el ensayo acelerado ASTM C1202 [Ref. 3].

Se compararon 4 mezclas de hormigón, 2 de ellas con adición de fibra y dos sin adición de fibra.

A continuación se describe las etapas para el desarrollo de la investigación, que incluye caracterización de los materiales utilizados, la confección de las probetas de hormigón y la ejecución de los ensayos.

### 4.1 Caracterización de los materiales

#### 4.1.1 Matriz aglomerante.

##### 4.1.1.1 Cemento

Se utilizó cemento Melón Extra, cemento portland puzolánico de alta resistencia.

Tabla 4.1 Propiedades del cemento indicadas por el fabricante

| Propiedades                        | Cemento Melón Extra |
|------------------------------------|---------------------|
| Peso Específico                    | 2,99                |
| Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | 5000                |
| Fraguado inicial (minutos)         | 90                  |
| Fraguado final (minutos)           | 125                 |

##### 4.1.1.2 Microsílice (MS)

Para el estudio se utilizó un tipo de microsílice proporcionado por la empresa SIKA Chile, comercializadora de aditivos y soluciones para hormigones en el país.

Tabla 4.2 Propiedades de la microsílíce utilizada:

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| Peso específico                 | 2,2  |
| SiO <sub>2</sub> [%]            | >85  |
| SO <sub>3</sub> [%]             | <2,0 |
| Cl [%]                          | <0,3 |
| CaO libre [%]                   | <1   |
| Pérdida [%]                     | <6   |
| Superficie específica:          | >15  |
| Índice de actividad puzolánica: | >105 |
| Retenido en 45 µm [%]           | <10  |

#### 4.1.1.3 Agua de amasado

En la totalidad de las muestras se utilizó agua proveniente de la red de agua potable de la comuna de Santiago.

#### 4.1.1.4 Áridos

Los áridos utilizados en el estudio fueron los siguientes:

- Gravilla de tamaño máximo 20 mm, proporcionada por Idiem, procedencia Río Maipo.
- Arena gruesa, proporcionada por Idiem, procedencia Río Maipo.

Las siguientes tablas entregan granulometrías y propiedades físicas de cada árido utilizado, junto con la curva granulométrica del árido combinado. Los ensayos de áridos se realizaron en el laboratorio de áridos de IDIEM.

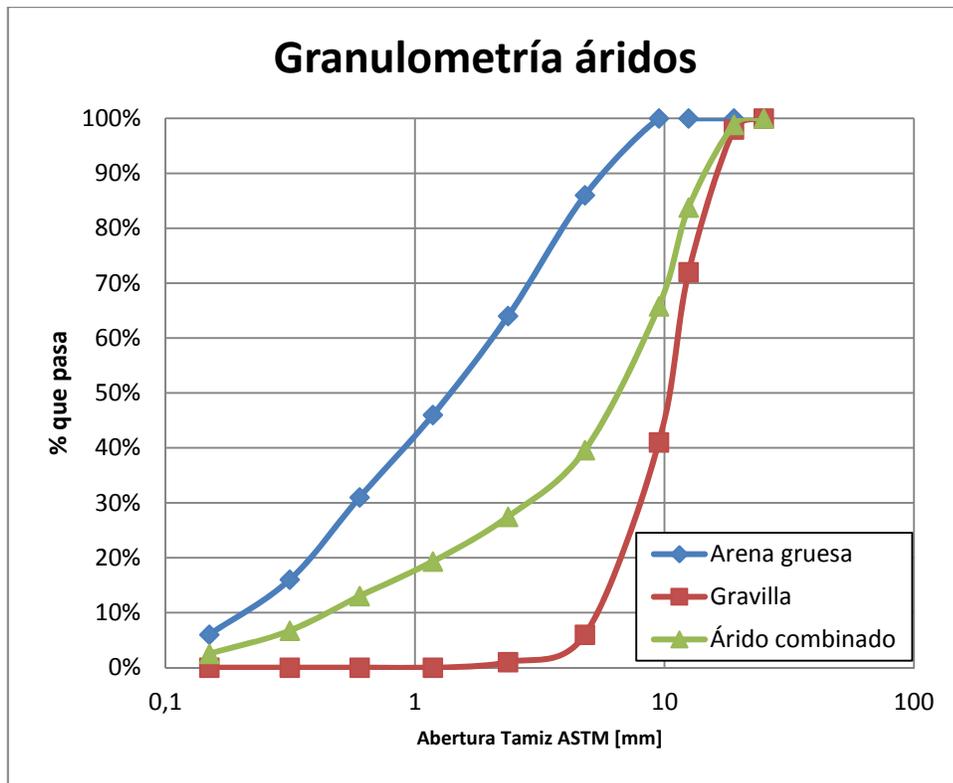
Tabla 4.3 Resultado análisis físico de áridos

| Fracción de Árido                                 | Gravilla     | Arena Gruesa |
|---|--------------|--------------|
| Procedencia                                       | Río Maipo    | Río Maipo    |
| Contenido de Material Fino Menor a 0,080 [mm] [%] | <b>0,20</b>  | <b>3,10</b>  |
| Densidad Real Seca [kg/m <sup>3</sup> ]           | <b>2.694</b> | <b>2.657</b> |
| Densidad Real SSS [kg/m <sup>3</sup> ]            | <b>2.719</b> | <b>2.699</b> |
| Densidad Neta [kg/m <sup>3</sup> ]                | <b>2.762</b> | <b>2.775</b> |
| Absorción de Agua [%]                             | <b>0,92</b>  | <b>1,60</b>  |
| Densidad Aparente Suelta [kg/m <sup>3</sup> ]     | <b>1.523</b> | <b>1.721</b> |
| Densidad Aparente Compactada [kg/m <sup>3</sup> ] | <b>1.649</b> | <b>1.853</b> |
| Huecos [%]  | <b>43,5</b>  | <b>35,2</b>  |

Tabla 4.4 Granulometría de áridos

| Tamaño [mm]                             | Porcentaje que pasa [%] |              |                     |
|---|-------------------------|--------------|---------------------|
|   | Gravilla                | Arena Gruesa | Árido Combinado (*) |
|   | 19 mm                   | 4 mm         |                     |
| 25                                      | <b>100</b>              | <b>100</b>   | <b>100</b>          |
| 19                                      | <b>98</b>               | <b>100</b>   | <b>99</b>           |
| 12,5                                    | <b>72</b>               | <b>100</b>   | <b>84</b>           |
| 9,5                                     | <b>41</b>               | <b>100</b>   | <b>66</b>           |
| 4,8                                     | <b>6</b>                | <b>86</b>    | <b>40</b>           |
| 2,36                                    | <b>1</b>                | <b>64</b>    | <b>27</b>           |
| 1,18                                    | <b>0</b>                | <b>46</b>    | <b>19</b>           |
| 0,6                                     | <b>0</b>                | <b>31</b>    | <b>13</b>           |
| 0,315                                   | <b>0</b>                | <b>16</b>    | <b>7</b>            |
| 0,15                                    | <b>0</b>                | <b>6</b>     | <b>3</b>            |
| Módulo de Finura                        | <b>6,54</b>             | <b>3,1</b>   | <b>3,66</b>         |
| (*) 58% (Gravilla) + 42% (Arena Gruesa) |                         |              |                     |

Gráfico 4.1 Curva granulométrica áridos



#### 4.1.1.5 Macro fibras de polipropileno

Se utilizó para el estudio macro fibra TUF-STRAND SF, Fibras sintéticas estructurales, proveedor Cave, conformadas por monofilamentos que se auto fibrilan al entrar en contacto con la mezcla de cemento.

Los datos técnicos de la fibra, proporcionados por el fabricante, se presentan a continuación

Tabla 4.5 Propiedades de las macro fibras

|                                   |   |                |
|-----------------------------------|---|----------------|
| Gravedad Específica               | : | 0.92           |
| Resistencia a Tracción [MPa]      | : | <b>600-650</b> |
| Módulo de elasticidad [GPa]       | : | <b>9.5</b>     |
| Punto de llama (ASTM D-1929) [°C] | : | <b>330</b>     |
| Longitud de fibra [mm]            | : | <b>50</b>      |
| Aspect Ratio                      | : | <b>74</b>      |

Ilustración 4.1 Macro fibra monofilamento



#### 4.1.1.6 Aditivo plastificante

Se utilizó aditivo Súper plastificante (reductor de agua de alto rango) marca NORMET TamCem 65B.

Las propiedades del aditivo, proporcionadas por el proveedor, se muestran a continuación:

Tabla 4.6 Propiedades del aditivo

|                            |   |                      |
|----------------------------|---|----------------------|
| Forma y aspecto líquido    | : | Ámbar                |
| Densidad aproximada [kg/l] | : | <b>1,08</b>          |
| pH                         | : | <b>7<sup>1</sup></b> |
| Cloruros [%] en peso       | : | <b>&lt;0,1</b>       |

---

<sup>1</sup> De acuerdo al análisis realizado por el laboratorio químico de IDIEM, el pH corresponde a 8.

## 4.2 Dosificaciones y confección del hormigón

Las dosificaciones empleadas en el estudio se presentan a continuación:

Tabla 4.7 Dosificaciones de hormigones estudiados

| Mezcla           | Cemento (kg) | Agua libre (l) | Gravilla (kg) | Arena (kg) | MS (kg) | Fibra (kg) | Aditivo (kg) |
|------------------|--------------|----------------|---------------|------------|---------|------------|--------------|
| HM A/C:<br>0,42  | 381,8        | 168,8          | 1055          | 764        | 20,1    | 0          | 1            |
| HMF A/C:<br>0,42 | 381,8        | 168,8          | 1055          | 764        | 20,1    | 3          | 2,1          |
| HC A/C:<br>0,55  | 384          | 211            | 1000          | 729        | 0       | 0          | 0            |
| HCF A/C:<br>0,55 | 384          | 230,8          | 1000          | 729        | 0       | 3          | 0,7          |

Una vez definidas las dosificaciones, se procedió a fabricar los hormigones de prueba.

Los áridos finos fueron utilizados con la condición de humedad con que se encontraban en los acopios, la cual fue determinada antes de confeccionar las series de hormigones.

Se fabricaron moldes de PVC de 110 mm de diámetro exterior, 19 cm de altura, un corte vertical para facilitar el desmolde, y como base se utilizó una tapa de PVC.

Para la confección del hormigón con adición de microsílíce, se mezcló el cemento con la microsílíce previo a la confección.

Para no sobrepasar la capacidad del laboratorio, cada hormigón se fabricó con una semana de desfase. En todas las coladas, de 70 litros cada una, se corrigió el agua de amasado, por el aporte de humedad de los áridos y del aditivo súper plastificante. Se utilizó una betonera dispuesta por la unidad de hormigones de prueba de IDIEM.

La mezcla de los materiales fue realizada en los siguientes pasos:

Se vertió en la betonera la arena gruesa, y se revolvió durante 30 segundos.

Se agregó la gravilla, revolviendo nuevamente por 30 segundos.

Se adicionó el material cementante y se revolvió durante 30 segundos.

Se agregó el 70% del agua de amasado, y se revolvió durante 2 minutos.

Posterior a eso se realizó la caracterización de la mezcla mediante asentamiento de cono.

Si la docilidad no era la buscada, se agregaba el restante de agua, y se revolvía durante 2 minutos, para posteriormente volver a medir asentamiento de cono.

Ilustración 4.2 Ensayo de asentamiento de cono HC



En el caso de hormigones con fibra, se agregó el aditivo súper plastificante en cantidades equivalentes al 30% del valor máximo recomendado por el fabricante. Se adicionaba 30 % de la dosis máxima de aditivo cada vez que la docilidad resultara por debajo de la buscada.

Al lograr la medida de cono de diseño, se procedía a tomar la densidad fresca mediante el llenado y masado de una medida volumétrica (cubo de resina de 150 mm de arista).

Caracterizado el hormigón con asentamiento de cono y densidad fresca, se procedía a llenar los moldes cilíndricos de PVC, mediante dos capas, vibrando en mesa vibradora durante 35 segundos. Además se llenaron 4 cubos de resina de 150 mm de arista, con el objetivo de caracterizar el hormigón ante la resistencia cúbica a compresión. Luego se enrasaron, y se dejaron en laboratorio protegidos de evaporación de agua con arpillera húmeda y cubierta plástica.

Ilustración 4.3 Hormigón de prueba HC



Transcurridas 72 horas, se desmoldaron e introdujeron en piscinas de agua saturada con cal hasta la edad de ensayo a compresión.

A los 7 días de edad, una probeta cúbica era ensayada a compresión. Posteriormente a los 28 días de edad, las 3 probetas cúbicas restantes se ensayaban a compresión. Con estos datos fue posible construir la curva de resistencia de cada mezcla.

### 4.3 Preparación para el ensayo de penetración de ion cloruro (ASTM C1202).

#### 4.3.1 Esfuerzo de compresión para generar fisuras

A los 28 días de edad, tres probetas cilíndricas fueron ensayadas a compresión para conocer carga de rotura de acuerdo a la norma NCh 1037. Of 77.

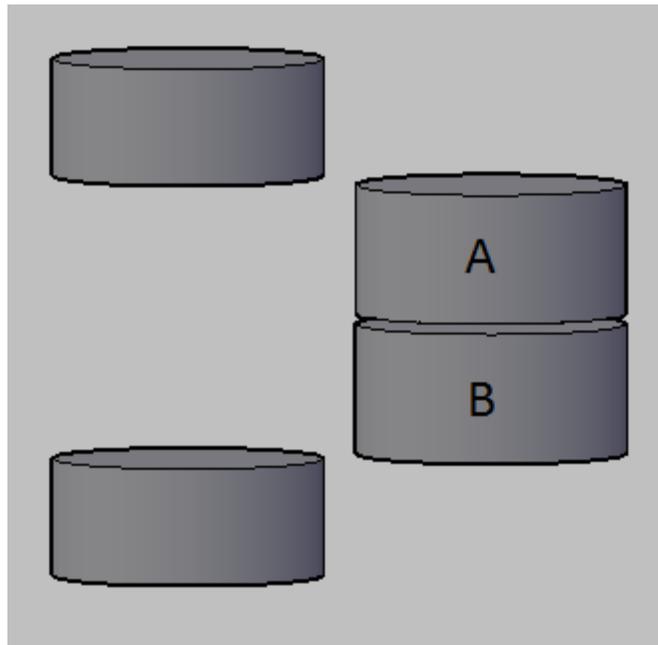
Las caras de los cilindros fueron tratadas con sierra dentada, para asegurar condiciones de perpendicularidad y planeidad necesarias para el ensayo a compresión.

Los resultados obtenidos fueron corregidos por esbeltez y se calculó el valor necesario para lograr un 20% y 40% de la carga de rotura (100%) en las demás probetas. En total se cargaron a compresión 9 probetas, 3 probetas por condición de carga (20, 40 y 100).

#### 4.3.2 Corte de probetas. Obtención de discos

Inmediatamente después de la compresión de las probetas, se obtuvieron dos discos de 50 mm de espesor y 104 mm de diámetro, del centro de la probeta, los cuales se marcaron tal como se muestra en la ilustración 4.4. Los extremos de la probeta cilíndrica fueron desechados.

Ilustración 4.4 Obtención de discos para ensayo ASTM C1202.



Completando 56 días de curado, los discos se prepararon para el ensayo ASTM C1202 [Ref. 3].

#### 4.3.3 Preparación para el ensayo de penetración de ion cloruro (ASTM C1202)

Los discos fueron retirados del lugar de curado, y cubiertos en el manto con resina epóxica SIKADUR -32 GEL, para asegurar que el flujo de la solución dentro de la probeta no aflore por el manto.

Las caras se rasparon con escobilla metálica y se sometieron a un proceso de vacío mediante cámara de secado, a una presión de 50 mm de Hg. Pasadas tres horas, se agregó agua destilada a la cámara de secado, cubriendo la totalidad de la probeta, continuando el vacío durante 1 hora.

Terminado este proceso, las probetas se mantuvieron en la misma agua durante  $18 \pm 2$  horas, y posteriormente fueron montadas en las celdas de carga, donde la unión entre celda y disco fue sellada con silicona.

#### 4.3.4 Ensayo ASTM C1202

El ensayo consiste en medir durante 6 horas el paso de la corriente a través de la probeta, tomando medidas cada treinta minutos, controlando caída de voltaje y temperatura, con la fuente de poder dentro del rango de operación de  $60 \pm 1\%$  V.

Ilustración 4.5 Montaje de ensayo ASTM C1202



Finalmente la cantidad de Coulomb que atraviesa el disco se obtiene mediante el área bajo la curva de la resistencia y la entrega del voltaje. El resultado de penetrabilidad se obtiene de acuerdo a la tabla 4.8

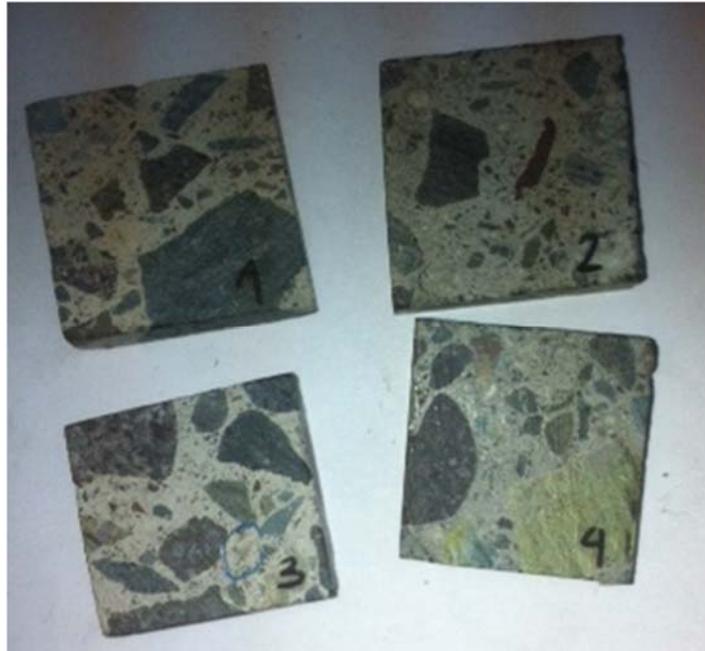
Tabla 4.8 Clasificación de penetrabilidad al ion cloruro de acuerdo a la ASTM C1202

| <b>Carga eléctrica (coulomb)</b> | <b>Penetrabilidad al Ion Cloruro</b> |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| <b>&gt;4000</b>                  | <b>Alta</b>                          |
| <b>2000-4000</b>                 | <b>Moderada</b>                      |
| <b>1000-2000</b>                 | <b>Baja</b>                          |
| <b>100-1000</b>                  | <b>Muy Baja</b>                      |
| <b>&lt;100</b>                   | <b>Despreciable</b>                  |

#### 4.3.5 Microscopía electrónica de las probetas ensayadas

Terminado el proceso de ensayo de acuerdo al ASTM C1202, se obtuvo del núcleo de las probetas curadas en piscinas de curado un prisma de 25 mm de arista y 5 mm de espesor. Para esta etapa se utilizaron los discos cargados al 20% de nivel de daño. Se descartaron los discos correspondientes a los cargados al 40% de daño debido al alto nivel de fisuración que presentaban, imposibilitando obtener un prisma de las dimensiones requeridas del núcleo de la probeta.

Ilustración 4.6 Prismas para análisis microscópico. Hormigón Convencional (1), Hormigón marítimo (2), Hormigón convencional con fibra (3), Hormigón marítimo con fibra (4).



Se realizó un análisis microscópico de la matriz aglomerante, tanto las propiedades químicas como físicas del prisma obtenido para el estudio, poniendo énfasis en la interfaz árido/matriz aglomerante, fibra/matriz aglomerante.

Se utilizó la tecnología SEM (microscopía electrónica de barrido), que consiste en inducir un delgado haz de electrones acelerados, sobre una muestra gruesa. Los resultados obtenidos del análisis se muestran en el siguiente capítulo. El objetivo de utilizar esta tecnología es observar el comportamiento e interacción de la matriz cementante con áridos y macro fibras.

## CAPITULO 5. RESULTADOS

### 5.1 Caracterización de hormigones estudiados.

#### 5.1.1 Trabajabilidad del hormigón

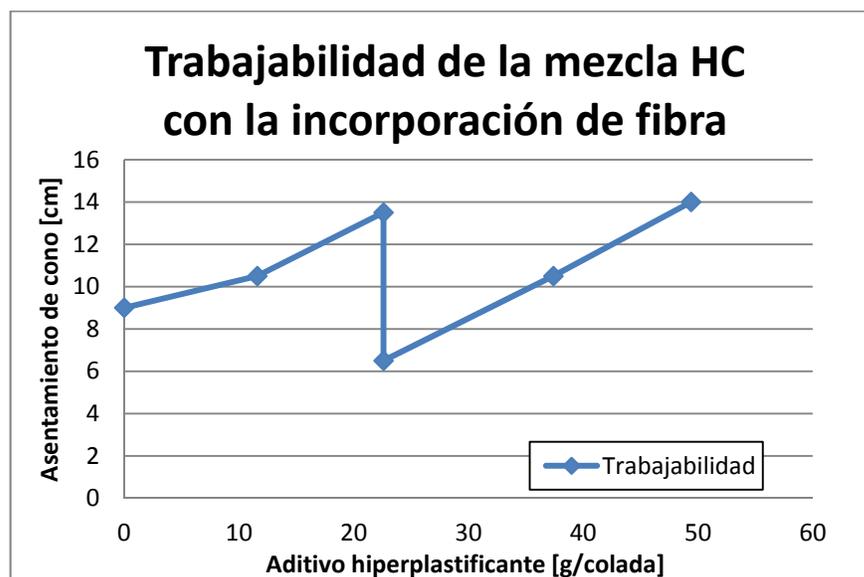
A continuación se muestra el resultado del asentamiento de cono, densidad del hormigón fresco y densidad de hormigón endurecido obtenidos de cada mezcla elaborada.

Tabla 5.1 Docilidad del hormigón

| Característica                                    | HC   | HM   | HCF  | HMF  |
|---|------|------|------|------|
| Asentamiento de cono [cm]                         | 14,0 | 14,0 | 14,0 | 15,0 |
| Densidad hormigón fresco [kg/m <sup>3</sup> ]     | 2,39 | 2,41 | 2,40 | 2,49 |
| Densidad hormigón endurecido [kg/m <sup>3</sup> ] | 2,40 | 2,41 | 2,37 | 2,40 |

Con los datos recopilados en la etapa de hormigones de prueba, se realizó un estudio de trabajabilidad del aditivo súper plastificante y la incorporación de macro fibra. Los resultados obtenidos para el hormigón convencional se muestran en el gráfico 5.1

Gráfico 5.1 Influencia de la incorporación de fibra en hormigón convencional.



La caída que muestra el gráfico corresponde a la medición de cono cuando se incorporó fibra a la mezcla. La pérdida de docilidad se recuperó

con la adición de aproximadamente 30 gr de aditivo, llegando a un total de 49 gramos para la colada de 70 litros de HC.

### 5.1.2 Resultados ensayo a compresión

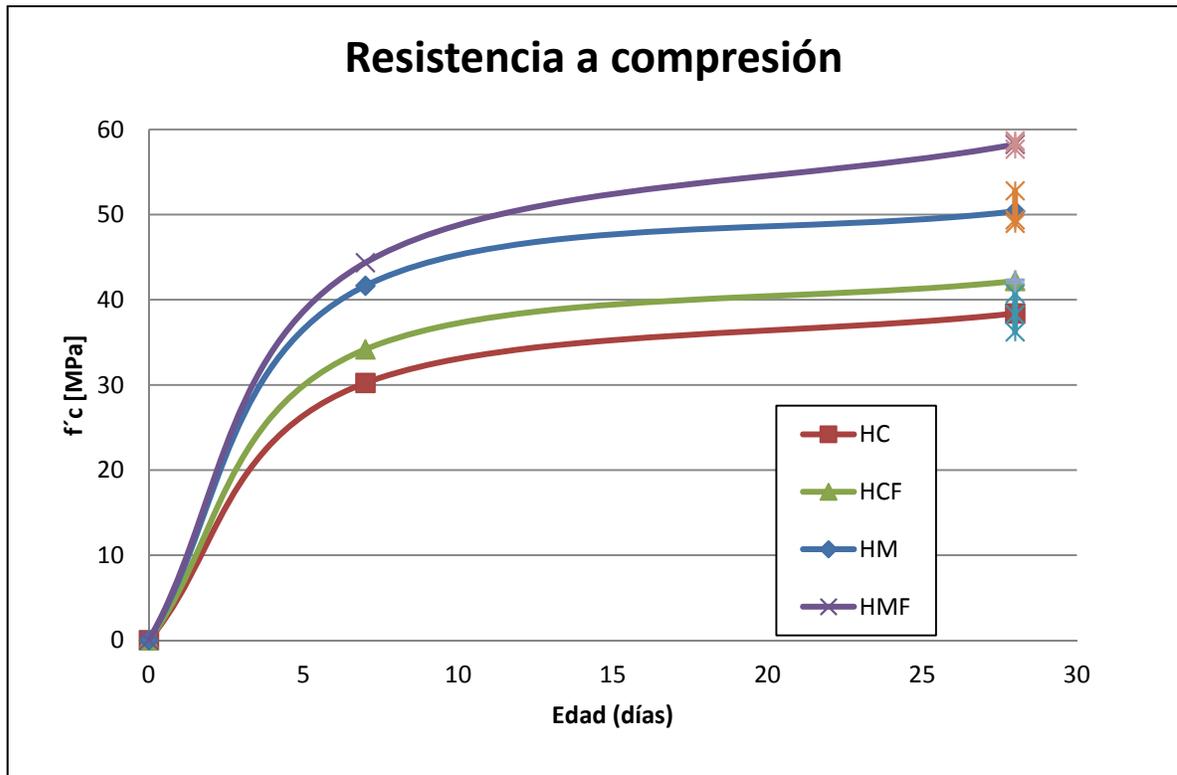
Los resultados de ensayo a compresión de las probetas cúbicas de 150 mm de arista se muestran a continuación:

Tabla 5.2 Resistencia a compresión del hormigón de diseño

| Tipo de hormigón | Resistencia a compresión a 28 días [MPa] | Desviación estándar |
|------------------|--|---------------------|
| HC               | 38,4                                     | 2,25                |
| HM               | 50,4                                     | 2,10                |
| HCF              | 42,2                                     | 0,23                |
| HMF              | 58,3                                     | 0,51                |

Con los resultados obtenidos se elaboró la curva de resistencia presentada en el gráfico 5.2

Gráfico 5.2 Resistencia a compresión a 28 días de hormigones fabricados.



Debido a las diferencias entre resistencia a compresión de probetas cúbicas y cilíndricas, además de los cubos se ensayaron a compresión 3 cilindros de cada muestra. Estos valores fueron los utilizados para someter a los cilindros a los distintos niveles de daño (0%, 20% y 40% con respecto a la tensión de rotura equivalente al 100% de resistencia a compresión, promedio de 3 probetas cilíndricas).

Tabla 5.3 Resistencia a compresión en cilindros

| Resistencia a compresión cilindros [MPa] |      |      |      |
|--|------|------|------|
| Tipo de hormigón/Nivel de daño           | 100% | 40%  | 20%  |
| HC                                       | 37,8 | 15,1 | 7,6  |
| HM                                       | 48,5 | 19,4 | 9,7  |
| HCF                                      | 41,5 | 16,6 | 8,3  |
| HMF                                      | 53,9 | 21,5 | 10,8 |

## 5.2 Resultados del estudio

A continuación se muestran los resultados de las probetas ensayadas.

Tabla 5.4 Resultados ensayo ASTM C1202

| Identificación probeta/<br>[% daño] |    | CARGA ELÉCTRICA<br>en coulomb | Criterio de aceptación<br>ASTM C1202 | Color asignado |
|-------------------------------------|----|-------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| HC                                  | 0  | 1651                          | Baja                                 |                |
|                                     | 20 | 1921                          | Baja                                 |                |
|                                     | 40 | 2364                          | Moderada                             |                |
| HCF                                 | 0  | 2079                          | Moderada                             |                |
|                                     | 20 | 2262                          | Moderada                             |                |
|                                     | 40 | 2663                          | Moderada                             |                |
| HM                                  | 0  | 611                           | Muy baja                             |                |
|                                     | 20 | 728                           | Muy baja                             |                |
|                                     | 40 | 1071                          | Baja                                 |                |
| HMF                                 | 0  | 532                           | Muy baja                             |                |
|                                     | 20 | 587                           | Muy baja                             |                |
|                                     | 40 | 638                           | Muy baja                             |                |

## 5.3 Microscopía electrónica de barrido

Luego de la etapa experimental, se obtuvo una muestra del núcleo de la probeta para observar la porosidad capilar y la microfisuración, particularmente en la interfaz fibra/matriz, árido/matriz. En esta etapa se utilizó probetas asociadas al 20% de daño impuesto.

Para ello se utilizó el Laboratorio de Microscopía Electrónica del Departamento de Geología, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Chile.

A continuación se aprecian las imágenes obtenidas en la microscopía.

Ilustración 5.1 Muestra correspondiente al núcleo de probeta HC20

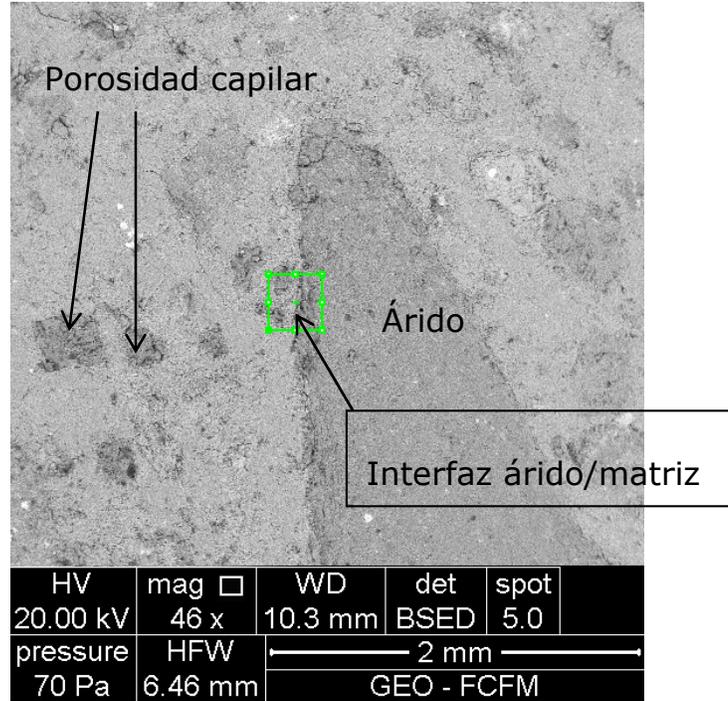


Ilustración 5.2 Acercamiento Interfaz árido/matriz núcleo probeta HC20

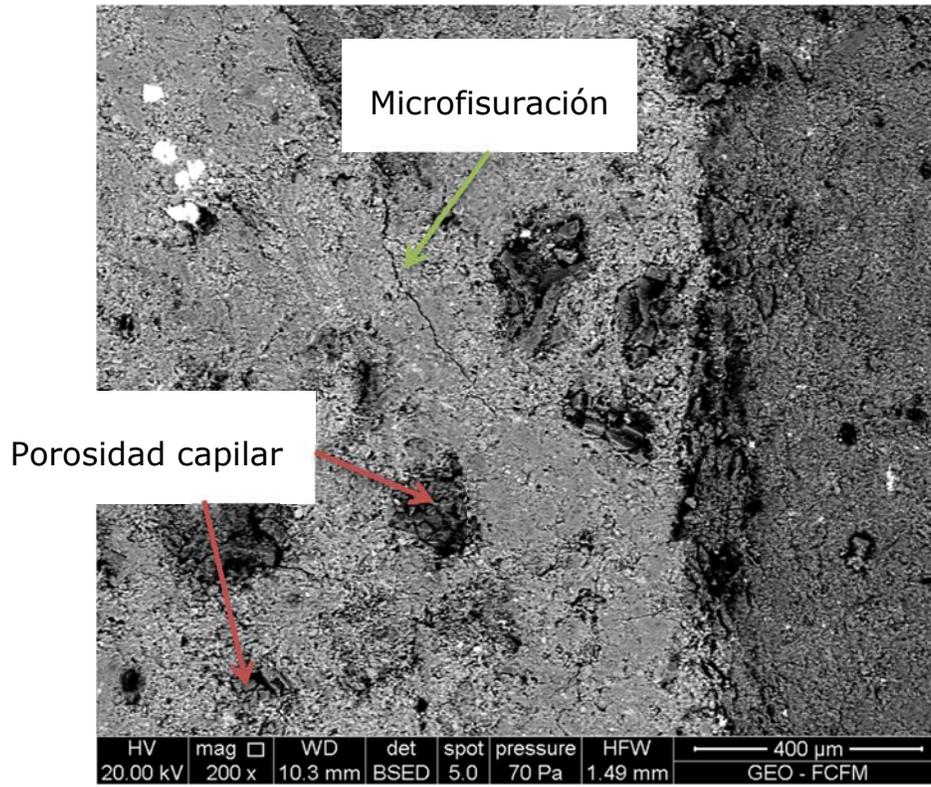


Ilustración 5.3 Muestra correspondiente al núcleo de probeta HM20

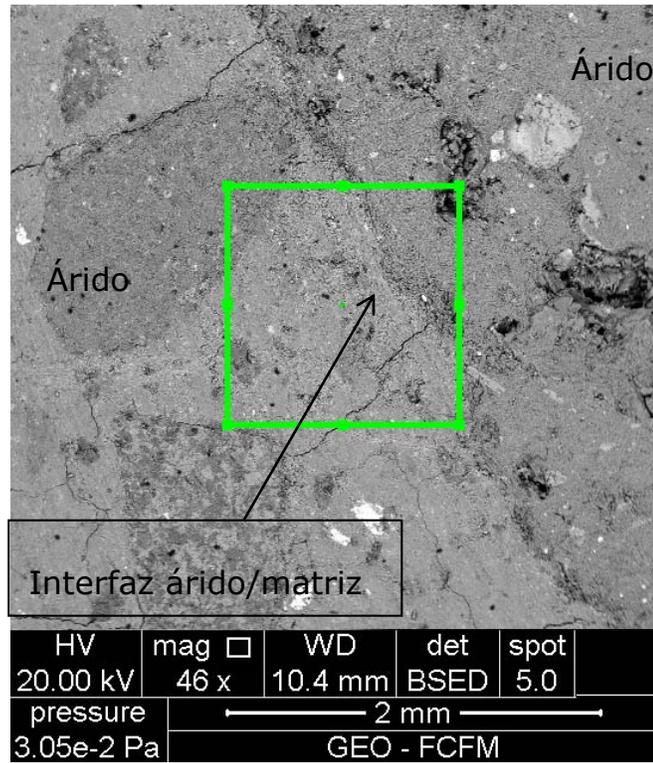


Ilustración 5.4 Acercamiento Interfaz árido/matriz núcleo probeta HM20

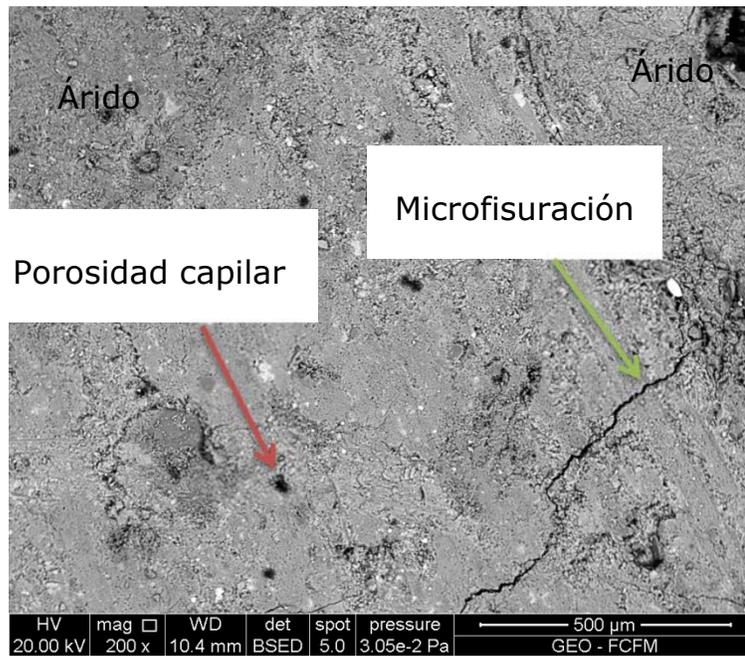


Ilustración 5.5 Muestra correspondiente al núcleo de probeta HCF20

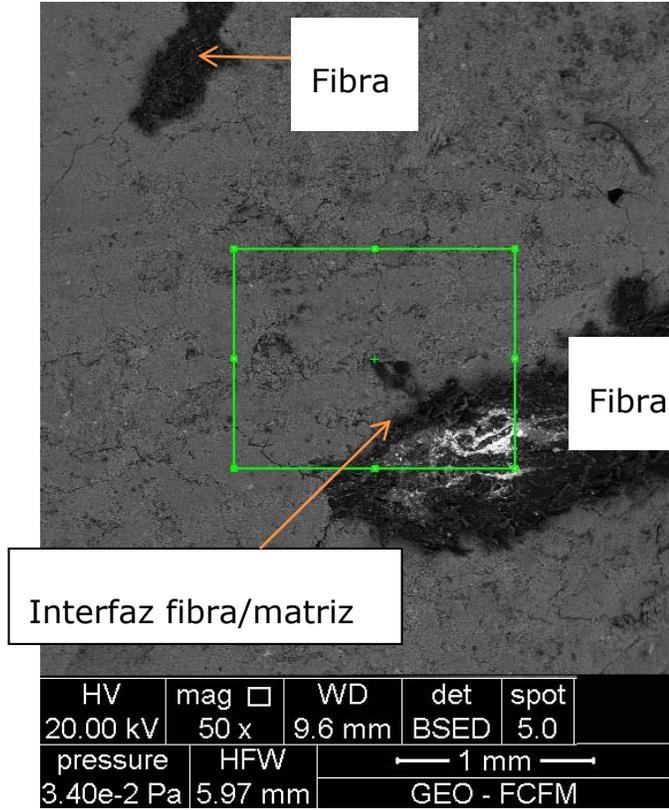


Ilustración 5.6 Acercamiento Interfaz árido/matriz núcleo probeta HCF20

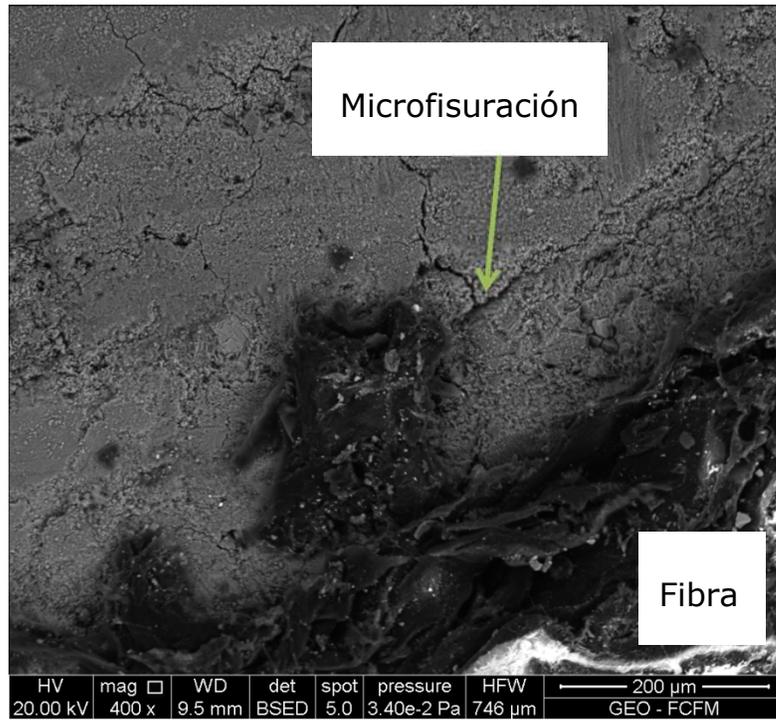


Ilustración 5.7 Muestra correspondiente al núcleo de probeta HMF20

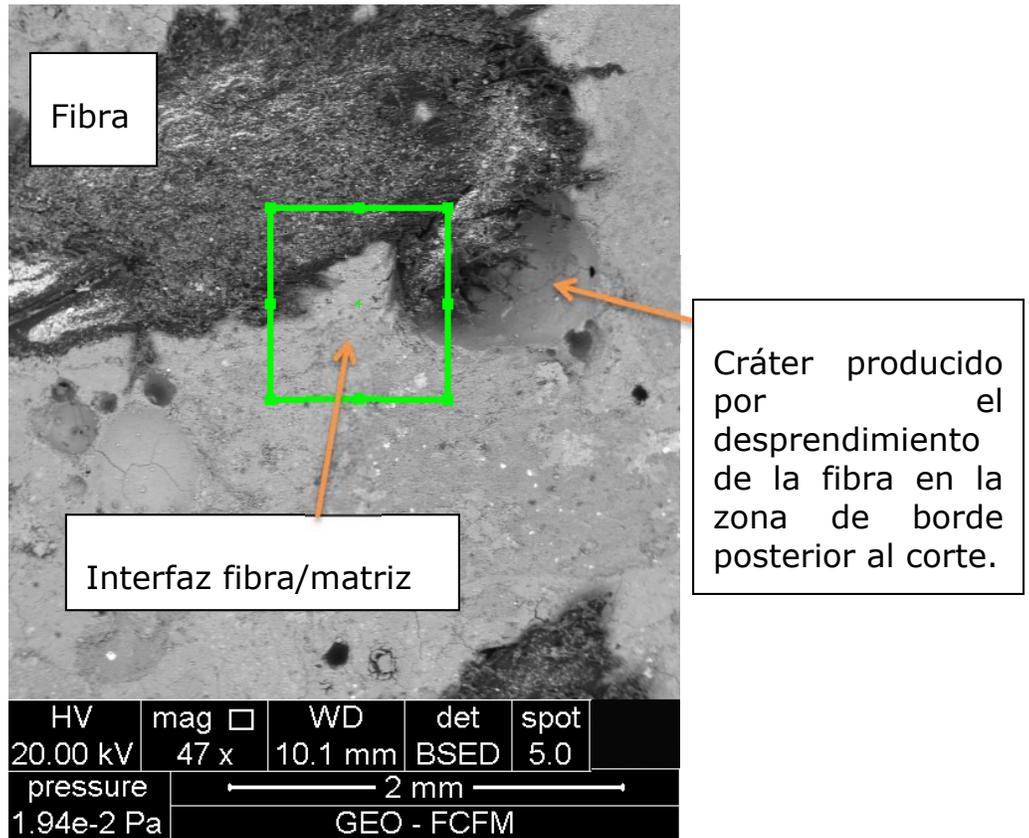
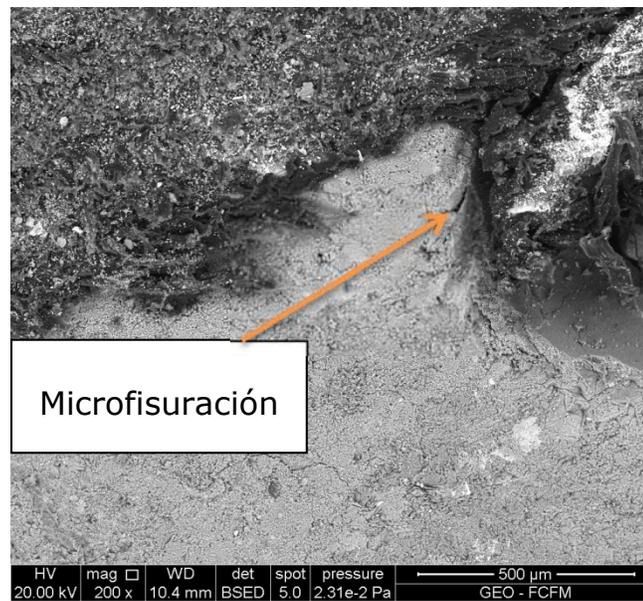


Ilustración 5.8 Acercamiento Interfaz árido/matriz núcleo probeta HMF20



Es posible apreciar la matriz porosa de la estructura correspondiente a la mezcla HC, mientras que la matriz del HM presenta una matriz de baja porosidad.

## CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Ensayo ASTM C1202

En el presente capítulo se analizan separadamente las distintas variables estudiadas en la investigación.

Los gráficos 6.1 y 6.2 muestran la carga eléctrica en coulomb obtenidas para los distintos hormigones del estudio (HC y HCF, HM y HMF).

Gráfico 6.1 Traspaso de carga eléctrica hormigón convencional con y sin fibras.

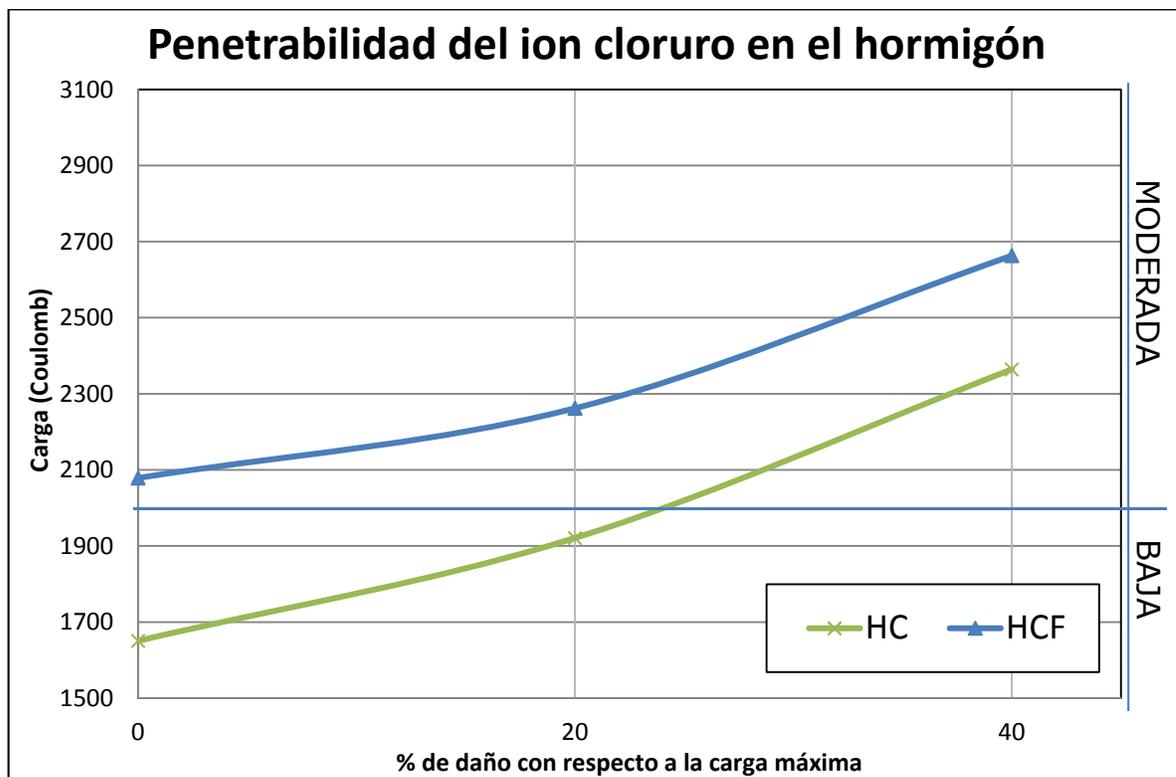
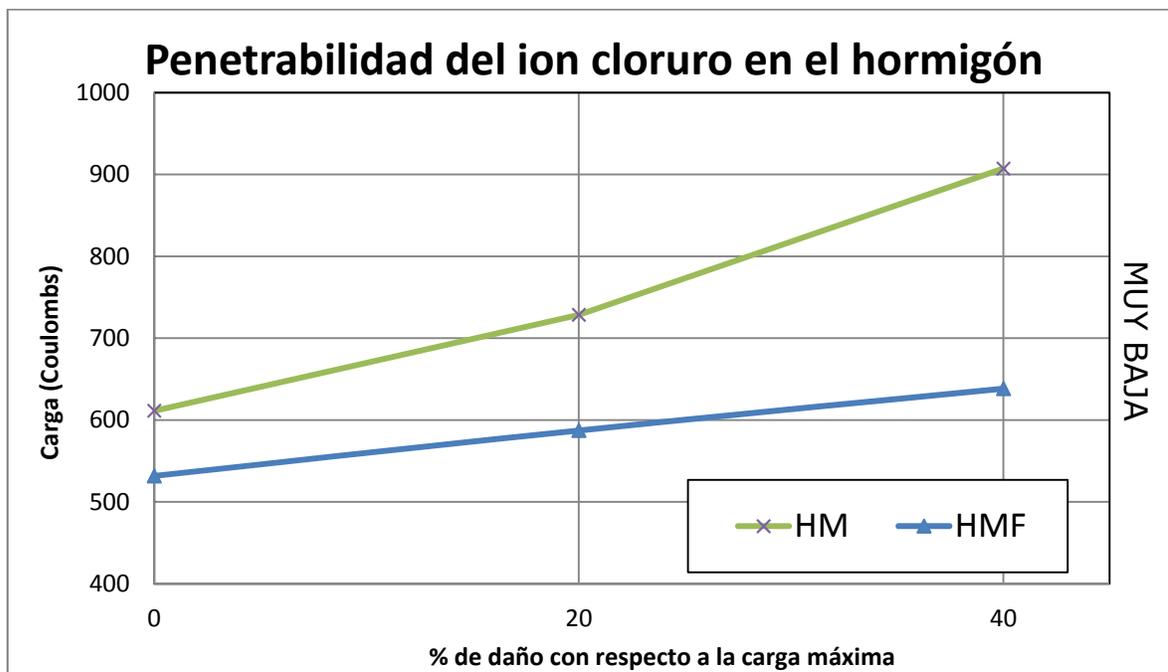


Gráfico 6.2 Traspaso de carga eléctrica hormigón marítimo con y sin fibras



Se puede apreciar en los gráficos 6.1 y 6.2 que el hormigón marítimo arroja menor traspaso de carga eléctrica en comparación del hormigón convencional.

#### 6.1.1 Influencia del tipo de hormigón.

A menor relación A/C, la penetrabilidad del hormigón al ion cloruro disminuye. Esta información corrobora lo encontrado en la literatura.

Al añadir microsílíce (ver tabla 6.1, que relaciona HC y HM), el traspaso de carga eléctrica disminuye en más del 50% con respecto al hormigón convencional. Esto se explica debido a la reducción de poros que genera la microsílíce, al ocupar el espacio físico vacío entre los granos de cemento [Ref. 30]

Tabla 6.1 Comportamiento en penetrabilidad a ion Cl de los hormigones estudiados para distintos niveles de daño impuestos.

| a) VARIABLE A/C | % de daño | Relación de penetrabilidad (HC-HM)/HC    |
|-----------------|-----------|--|
|                 | 0         | 63%                                      |
|                 | 20        | 62%                                      |
|                 | 40        | 55%                                      |
|                 | % de daño | Relación de penetrabilidad (HCF-HMF)/HCF |
|                 | 0         | 74%                                      |
|                 | 20        | 74%                                      |
|                 | 40        | 76%                                      |

### 6.1.2 Influencia de la incorporación de macro fibras en el hormigón

Los resultados del ensayo ASTM C1202 difieren dependiendo del tipo de hormigón.

En el estado endurecido, las propiedades mecánicas se ven levemente afectadas, lo que se explica debido al trabajo de la fibra en el desarrollo de las fisuras y grietas.

Tabla 6.2 Comportamiento en penetrabilidad a ion Cl de los hormigones estudiados para distintos niveles de daño impuestos.

| b) VARIABLE FIBRA | % de daño | Relación de penetrabilidad (HC-HCF)/HC |
|-------------------|-----------|--|
|                   | 0         | 26%                                    |
|                   | 20        | 18%                                    |
|                   | 40        | 13%                                    |
|                   | % de daño | Relación de penetrabilidad (HM-HMF)/HM |
|                   | 0         | 13%                                    |
|                   | 20        | 19%                                    |
|                   | 40        | 40%                                    |

Para el hormigón convencional, al agregar fibra la relación de penetrabilidad del ion cloruro es desfavorable. Debido a la elevada dispersión de resultados en hormigones estudiados, se descartó uno de los resultados asociados al 40% de daño de la variable "porcentaje de fisuras".

Con respecto al hormigón marítimo, la incorporación de fibras, favorece a la penetrabilidad del ion cloruro en el hormigón, es decir, el traspaso de carga eléctrica se reduce.

### 6.1.3 Influencia de la carga a la cual fue sometida la probeta.

Se confirma que el traspaso de carga a través de la probeta es proporcional al daño que tiene esta. La variable porcentaje de fisuras asociada al 40% de daño se escapa de rango con respecto a los otros resultados, por lo que se dejará fuera del análisis y conclusiones.

Hormigones con presencia de fibra y matriz poco porosa presentan resultados de menor penetrabilidad al ion cloruro.

## 6.2 Análisis microscópico

Como se mencionó en el capítulo anterior, punto 6.1.2 y 6.1.3, la variable porcentaje de fisuras asociada al nivel de daño 40% fue eliminada.

Las imágenes del estudio microscópico revelan que la microestructura del hormigón marítimo es más uniforme y compacta que el hormigón convencional, lo que estaría asociado a la adición de microsílíce [Ref. 10, 12] Las fotografías del análisis microscópico se pueden observar en el anexo N°9.

La matriz HCF presentan interfaz fibra-matriz cementante con vacíos de macro porosidad, detallados a escala de  $\mu\text{m}$ , si bien la fibra controla la microfisuración, esta presencia de vacíos en la interfaz explica el comportamiento observado en el ensayo ASTM C1202. El tamaño de los vacíos se ve reducido con el uso de microsílíce, como se puede apreciar en el estudio macroscópico de hormigones marítimos HMF.

## CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

Las principales conclusiones del trabajo experimental son las siguientes:

La mezcla de diseño con menor relación A/MC presenta menor traspaso de carga eléctrica, con índices de resistencia a la penetración del ion cloruro menores. Esto se explica por la mejora física y química que presenta la matriz cementante, en donde las partículas de microsilíce disminuyen el tamaño de los poros con respecto a la matriz del hormigón convencional al aumentar la proporción de C-S-H por reacciones puzolánicas del CH con la microsilíce.

La adición de macro fibras de polipropileno disminuye el traspaso de iones en hormigones marítimos (hormigones con adición de microsilíce) conforme a lo esperado. Este resultado tiene dos posibles causas. La primera es que la presencia de macro fibras impide que las fisuras se desarrollen en su totalidad, generándose una fisuración más fina que en el hormigón sin MS, lo que implica que el traspaso de solución a través de la probeta estudiada se vea disminuido. La segunda posible causa es que la adición de microsilíce ayude a la interfaz fibra-matriz de cemento, provocando una reducción en el tamaño de los poros en la zona de transición, ocasionando la disminución en el traspaso de carga eléctrica. Por el contrario, en hormigones convencionales, sin adición de microsilíce, el traspaso de carga eléctrica es mayor cuando existe adición de macro fibras. Asumiendo que independiente de la composición de la matriz, las fibras aportan al control de la formación de fisuras, la razón de la disminución en el traspaso de carga se debe a la mejora en la interfaz fibra-matriz cementante que se observa en hormigones marítimos.

La principal conclusión con respecto a esta variable es que cuando se tengan hormigones que incorporen en su diseño el uso de macro fibras, es necesario reducir la porosidad de la matriz en la interfaz, y velar para que la interfaz fibra-matriz no presente vacíos, incorporando microsilíce o algún producto cementante que reduzca el tamaño de los poros y favorezca la trabajabilidad del hormigón con la fibra.

El uso de macro fibras mejora las propiedades físicas del hormigón, pero se debe incorporar reductores de porosidad para evitar que la mejora en propiedades físicas afecte de manera negativa la vida útil de la estructura.

## 7.2 Recomendaciones

A partir del trabajo experimental realizado en la presente investigación, se derivan las siguientes investigaciones que analicen lo siguiente:

Estudiar distintos niveles de incorporación de macro fibras, para encontrar el contenido óptimo que asegure una penetrabilidad baja de cloruros en el hormigón.

Estudiar la adición de otros agentes impermeabilizantes de masa, como por ejemplo nanosílise u otros agentes impermeabilizantes en base a algún producto por cristalización.

Comparar distintos métodos para medir permeabilidad del ion cloruro en el hormigón, que no se vean afectados por los distintos iones presentes en la matriz aglomerante.

Elaborar un programa experimental detallado que permita estudiar cada variable en profundidad, y posteriormente utilizar los datos obtenidos para realizar un modelo computacional que permita estimar la vida útil de las estructuras de hormigón armado introduciendo todas las variables estudiadas.

## CAPITULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Guía para la durabilidad del Hormigón" ACI 201.2R-01. American Concrete Institute. 2001
- [2] "Properties of concrete in the cover zone: water penetration, sorptivity and ionic ingress", W. J. McCarter; H. Ezirim; M. Emerson, 01 September 1996, : Magazine of Concrete Research, Volume 48, Issue 176, pag 149-156.
- [3] "Microscopic study into biodeterioration of marine concrete".P. Hughesa, D. Fairhursta, I. Sherringtonb, N. Renevierb, L.H.G. Mortonc, P.C. Roberyd, L. Cunninghame. International Biodeterioration and biodegradation. Volume 79, April 2013, pag 14-19.
- [4] "Patologías desarrolladas en una estructura de hormigón en zona marítima." Señas, L. Maiza, P., Prianco, C., Marfil, S. Junio de 2010.
- [5] "Effect of microcracking on gas permeability and chloride diffusion of concrete" A. Djerbi Tegger, S bonnet, A. Khelidj, V. Baroghel-Bouny. Año no informado.
- [6] "Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete". A.A. Ramezaniapoura, S.A. Ghaharia, M. Esmaeilb. Construction and Building Materials. Volume 58, 15 May 2014, Pages 138–146.
- [7] Resistencia a los cloruros en el concreto adicionado con escoria de alto horno. Nalielt Santamaría, Luis Yamín, Carlos Arcilla, mayo de 2006.
- [8] DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. Programa Iberoamericano de Ciencia y tecnología para el desarrollo CYTED (1998)
- [9] THE MATHEMATICS OF DIFFUSION, J. CRANK, 1975.

- [10] "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", ACI Committee 234. Abril de 2006.
- [11] Properties of concrete incorporating silica fume and nano-SiO<sub>2</sub>. Davoud Tavakoli, Ali Heidari. Enero 2013.
- [12] Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. Mohammad Iqbal Khan, Rafat Siddique, Septiembre 2011.
- [13] Super high strength high performance concrete
- [14] Durabilidad y propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con adición de microsílíce y nanosílíce. H. Romero, J. Galvez, I. Lucea, A. Moragues. Diciembre de 2012.
- [15] Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. Zengzhi Sun, Qinwu Xu, Diciembre de 2012.
- [16] Effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. Peng Zhang, Qing-fu Li. 2011.
- [17] The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. Hakan Bolat, Osman Simsek, Mustafa Cullu, Gokham Durmus, Oer Can. Enero 2014.
- [18] Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. Sehaj Sing, Arum Shukla, Richard Brown. February 2004.
- [19] "Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction" T.A. Sôylev, T. Ôzturan. Octubre de 2014.
- [20] Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. Peng Zhang, Febrero de 2013.

- [21] Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. Houssam A. Toutanji. 1999.
- [22] "Chloride Permeability and Impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete". H. Toutanji, S. McNeil and Z. Bayasi. Mayo 1998.
- [23] The long-term compressive strength and durability properties of silica fume fiber-reinforced concrete. Mahmoud Nili, V. Afroughsabet. Octubre 2011.
- [24] Effect of high volume fly ash on mechanical properties of fiber reinforced concrete. O. Kayali. Materials and Structures, Junio 2004.
- [25] The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete Mahmoud Nili, V. Afroughsabet. Diciembre 2009.
- [26] Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non metallic fibres. A Sivakumar, Manu Santhanam. Marzo 2007.
- [27] Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's ability Ability to Resist Chloride Ion Penetration" (ASTM C1202-2012).
- [28] Another look at the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277). Caijun Shi. No indica año de publicación.
- [29] "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression C469/C469M-14
- [30] Carrasco, J. 2006 Estudio experimental de hormigones de alta Resistencia a la penetración de iones cloruro. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile.

- [31] Gonzalez, A. 2011. Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro.
- [32] NCh 1037. Of 77. Compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.
- [33] Microscopic examination of deteriorated concrete. Nijland, T.G. · Larbi, J.A., 2010.
- [34] Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. Seung Hun Park, Dong Joo Kim, Gum Sung Ryu, Kyung Taek Koh. Febrero de 2012.
- [35] Guidance to fibre concrete. ERMCO. EUROPEAN READY MIXED CONCRETE ORGANIZATION. Septiembre 2012.
- [36] Shear Strength and Ductility of Beams Reinforced with Synthetic Macro-Fibers. H.L. Romero, J.C. Gálvez, I. Lucea y A. Moragues. Diciembre de 2012.
- [37] Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression. C. Lim, N Goweripalan, V. Sirivivatnanon. Octubre de 2000.
- [38] Pore structure and chloride ion permeability of mortars containing silica fume. Kazuyuki Torii, Mitsunori Kawamura. Febrero de 2013.

## CAPITULO 9. ANEXOS

### 9.1 Resultados ensayo ASTM C1202

Tabla 9.1 Ensayo Probeta A HC0

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 10:45             | 1         | 1,5                   | 0,06      | 21,2           |
| 11:15             | 2         | 1,7                   | 0,068     | 22,4           |
| 11:45             | 3         | 1,8                   | 0,072     | 23,3           |
| 12:15             | 4         | 1,9                   | 0,076     | 24,5           |
| 12:45             | 5         | 2,1                   | 0,084     | 26,6           |
| 13:15             | 6         | 2,2                   | 0,088     | 26,8           |
| 13:45             | 7         | 2,3                   | 0,092     | 27,6           |
| 14:15             | 8         | 2,4                   | 0,096     | 29             |
| 14:45             | 9         | 2,5                   | 0,1       | 29,8           |
| 15:15             | 10        | 2,6                   | 0,104     | 30,4           |
| 15:45             | 11        | 2,7                   | 0,108     | 30,9           |
| 16:15             | 12        | 2,8                   | 0,112     | 32,3           |
| 16:45             | 13        | 2,9                   | 0,116     | 32,6           |
| Q total [Coulomb] | 1958,4    | Q corregida [Coulomb] |           | 1634           |

Tabla 9.2 Ensayo probeta A HC20

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 1,8                   | 0,072     | 23,1           |
| 14:00             | 2         | 2,1                   | 0,084     | 23,2           |
| 14:30             | 3         | 2,2                   | 0,088     | 23,5           |
| 15:00             | 4         | 2,2                   | 0,088     | 25,1           |
| 15:30             | 5         | 2,3                   | 0,092     | 27,2           |
| 16:00             | 6         | 2,5                   | 0,1       | 31,1           |
| 16:30             | 7         | 2,6                   | 0,104     | 32,7           |
| 17:00             | 8         | 2,6                   | 0,104     | 33,5           |
| 17:30             | 9         | 2,8                   | 0,112     | 34,3           |
| 18:00             | 10        | 2,9                   | 0,116     | 35,1           |
| 18:30             | 11        | 3,1                   | 0,124     | 36,6           |
| 19:00             | 12        | 3,2                   | 0,128     | 38             |
| 19:30             | 13        | 3,3                   | 0,132     | 38,8           |
| Q total [Coulomb] | 2235,6    | Q corregida [Coulomb] |           | 1865           |

Tabla 9.3 Ensayo probeta A HC40

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 2,1                   | 0,084     | 23,1           |
| 14:00             | 2         | 2,4                   | 0,096     | 23,2           |
| 14:30             | 3         | 2,4                   | 0,096     | 23,5           |
| 15:00             | 4         | 2,5                   | 0,1       | 25,1           |
| 15:30             | 5         | 2,7                   | 0,108     | 27,2           |
| 16:00             | 6         | 2,9                   | 0,116     | 31,1           |
| 16:30             | 7         | 3                     | 0,12      | 32,7           |
| 17:00             | 8         | 3                     | 0,12      | 33,5           |
| 17:30             | 9         | 3,1                   | 0,124     | 34,3           |
| 18:00             | 10        | 3,2                   | 0,128     | 35,1           |
| 18:30             | 11        | 3,3                   | 0,132     | 36,6           |
| 19:00             | 12        | 3,4                   | 0,136     | 38             |
| 19:30             | 13        | 3,4                   | 0,136     | 38,8           |
| Q total [Coulomb] | 2494,8    | Q corregida [Coulomb] |           | 2082           |

Tabla 9.4 Ensayo probeta B HC0

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 1,6                   | 0,064     | 23,1           |
| 14:00             | 2         | 1,7                   | 0,068     | 23,2           |
| 14:30             | 3         | 1,8                   | 0,072     | 23,5           |
| 15:00             | 4         | 2                     | 0,08      | 25,1           |
| 15:30             | 5         | 2                     | 0,08      | 27,1           |
| 16:00             | 6         | 2,3                   | 0,092     | 29             |
| 16:30             | 7         | 2,3                   | 0,092     | 31,1           |
| 17:00             | 8         | 2,5                   | 0,1       | 32,5           |
| 17:30             | 9         | 2,6                   | 0,104     | 33             |
| 18:00             | 10        | 2,7                   | 0,108     | 33,6           |
| 18:30             | 11        | 2,8                   | 0,112     | 34,6           |
| 19:00             | 12        | 2,8                   | 0,112     | 35,7           |
| 19:30             | 13        | 2,9                   | 0,116     | 37             |
| Q total [Coulomb] | 1998      | Q corregida [Coulomb] |           | 1667           |

Tabla 9.5 Ensayo probeta B HC20

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 1,8                   | 0,072     | 23,1           |
| 14:00             | 2         | 1,9                   | 0,076     | 23,2           |
| 14:30             | 3         | 2                     | 0,08      | 23,5           |
| 15:00             | 4         | 2,2                   | 0,088     | 25,1           |
| 15:30             | 5         | 2,3                   | 0,092     | 27,2           |
| 16:00             | 6         | 2,7                   | 0,108     | 31,1           |
| 16:30             | 7         | 2,8                   | 0,112     | 32,7           |
| 17:00             | 8         | 2,9                   | 0,116     | 33,5           |
| 17:30             | 9         | 3,2                   | 0,128     | 34,3           |
| 18:00             | 10        | 3,2                   | 0,128     | 35,1           |
| 18:30             | 11        | 3,4                   | 0,136     | 36,6           |
| 19:00             | 12        | 3,6                   | 0,144     | 38             |
| 19:30             | 13        | 3,6                   | 0,144     | 38,8           |
| Q total [Coulomb] | 2368,8    | Q corregida [Coulomb] | 1977      |                |

Tabla 9.6 Ensayo probeta B HC40

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 10:45             | 1         | 2,4                   | 0,096     | 23,1           |
| 11:15             | 2         | 2,8                   | 0,112     | 23,2           |
| 11:45             | 3         | 3,1                   | 0,124     | 23,5           |
| 12:15             | 4         | 3,2                   | 0,128     | 25,1           |
| 12:45             | 5         | 3,4                   | 0,136     | 27,2           |
| 13:15             | 6         | 3,5                   | 0,14      | 31,1           |
| 13:45             | 7         | 3,7                   | 0,148     | 32,7           |
| 14:15             | 8         | 3,9                   | 0,156     | 33,5           |
| 14:45             | 9         | 4                     | 0,16      | 34,3           |
| 15:15             | 10        | 4,2                   | 0,168     | 35,1           |
| 15:45             | 11        | 4,3                   | 0,172     | 36,6           |
| 16:15             | 12        | 4,5                   | 0,18      | 38             |
| 16:45             | 13        | 4,5                   | 0,18      | 38,8           |
| Q total [Coulomb] | 3171,6    | Q corregida [Coulomb] | 2646      |                |

Tabla 9.7 Ensayo Probeta A HM0

| Hora              | N Lectura | Lectura mV            | Lectura A | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 10:45             | 1         | 0,7                   | 0,028     | 23,2           |
| 11:15             | 2         | 0,7                   | 0,028     | 23,6           |
| 11:45             | 3         | 0,8                   | 0,032     | 23,9           |
| 12:15             | 4         | 0,8                   | 0,032     | 24,4           |
| 12:45             | 5         | 0,8                   | 0,032     | 24,8           |
| 13:15             | 6         | 0,8                   | 0,032     | 24,9           |
| 13:45             | 7         | 0,8                   | 0,032     | 25,4           |
| 14:15             | 8         | 0,8                   | 0,032     | 25,5           |
| 14:45             | 9         | 0,8                   | 0,032     | 25,6           |
| 15:15             | 10        | 0,8                   | 0,032     | 25,6           |
| 15:45             | 11        | 0,8                   | 0,032     | 25,7           |
| 16:15             | 12        | 0,9                   | 0,036     | 26,1           |
| 16:45             | 13        | 0,9                   | 0,036     | 26,3           |
| Q total [Coulomb] | 691,2     | Q corregida [Coulomb] | 577       |                |

Tabla 9.8 Ensayo probeta A HM20

| Hora              | N Lectura | Lectura mV            | Lectura A | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 0,8                   | 0,032     | 21             |
| 14:00             | 2         | 0,8                   | 0,032     | 21,1           |
| 14:30             | 3         | 0,9                   | 0,036     | 21,9           |
| 15:00             | 4         | 0,9                   | 0,036     | 22,2           |
| 15:30             | 5         | 1                     | 0,04      | 23,1           |
| 16:00             | 6         | 1                     | 0,04      | 23,8           |
| 16:30             | 7         | 1                     | 0,04      | 24,3           |
| 17:00             | 8         | 1,1                   | 0,044     | 24,8           |
| 17:30             | 9         | 1,1                   | 0,044     | 25,8           |
| 18:00             | 10        | 1,1                   | 0,044     | 26,3           |
| 18:30             | 11        | 1,1                   | 0,044     | 26,9           |
| 19:00             | 12        | 1,1                   | 0,044     | 27,1           |
| 19:30             | 13        | 1,2                   | 0,048     | 27,8           |
| Q total [Coulomb] | 871,2     | Q corregida [Coulomb] | 727       |                |

Tabla 9.9 Ensayo probeta A HM40

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 1,3                   | 0,052     | 22,6           |
| 14:00             | 2         | 1,4                   | 0,056     | 24             |
| 14:30             | 3         | 1,5                   | 0,06      | 25             |
| 15:00             | 4         | 1,5                   | 0,06      | 26             |
| 15:30             | 5         | 1,6                   | 0,064     | 27             |
| 16:00             | 6         | 1,7                   | 0,068     | 28             |
| 16:30             | 7         | 1,7                   | 0,068     | 29             |
| 17:00             | 8         | 1,8                   | 0,072     | 30             |
| 17:30             | 9         | 1,9                   | 0,076     | 31             |
| 18:00             | 10        | 1,9                   | 0,076     | 31             |
| 18:30             | 11        | 1,9                   | 0,076     | 33             |
| 19:00             | 12        | 2                     | 0,08      | 33             |
| 19:30             | 13        | 2                     | 0,08      | 34             |
| Q total [Coulomb] | 1479,6    | Q corregida [Coulomb] |           | 1235           |

Tabla 9.10 Ensayo probeta B HM0

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 10:45             | 1         | 0,7                   | 0,028     | 24,3           |
| 11:15             | 2         | 0,8                   | 0,032     | 24,7           |
| 11:45             | 3         | 0,9                   | 0,036     | 25,4           |
| 12:15             | 4         | 0,9                   | 0,036     | 25,7           |
| 12:45             | 5         | 0,9                   | 0,036     | 26,1           |
| 13:15             | 6         | 0,9                   | 0,036     | 26,2           |
| 13:45             | 7         | 0,9                   | 0,036     | 26,5           |
| 14:15             | 8         | 0,9                   | 0,036     | 26,6           |
| 14:45             | 9         | 0,9                   | 0,036     | 26,7           |
| 15:15             | 10        | 0,9                   | 0,036     | 27,1           |
| 15:45             | 11        | 0,9                   | 0,036     | 27,2           |
| 16:15             | 12        | 1                     | 0,04      | 27,3           |
| 16:45             | 13        | 1                     | 0,04      | 27,5           |
| Q total [Coulomb] | 774       | Q corregida [Coulomb] |           | 646            |

Tabla 9.11 Ensayo probeta B HM20

| Hora             | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30            | 1         | 0,8                   | 0,032     | 20,9           |
| 14:00            | 2         | 0,9                   | 0,036     | 21,1           |
| 14:30            | 3         | 1                     | 0,04      | 21,7           |
| 15:00            | 4         | 1                     | 0,04      | 22,5           |
| 15:30            | 5         | 1                     | 0,04      | 23,1           |
| 16:00            | 6         | 1                     | 0,04      | 23,6           |
| 16:30            | 7         | 1                     | 0,04      | 24,3           |
| 17:00            | 8         | 1                     | 0,04      | 24,8           |
| 17:30            | 9         | 1                     | 0,04      | 25,8           |
| 18:00            | 10        | 1,1                   | 0,044     | 26,1           |
| 18:30            | 11        | 1,1                   | 0,044     | 16,8           |
| 19:00            | 12        | 1,1                   | 0,044     | 27             |
| 19:30            | 13        | 1,1                   | 0,044     | 27,1           |
| Q total Coulomb] | 874,8     | Q corregida [Coulomb] |           | 730            |

Tabla 9.12 Ensayo probeta B HM40

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 1                     | 0,04      | 23             |
| 14:00             | 2         | 1,1                   | 0,044     | 24             |
| 14:30             | 3         | 1,1                   | 0,044     | 24             |
| 15:00             | 4         | 1,2                   | 0,048     | 26             |
| 15:30             | 5         | 1,2                   | 0,048     | 26             |
| 16:00             | 6         | 1,3                   | 0,052     | 27             |
| 16:30             | 7         | 1,3                   | 0,052     | 28             |
| 17:00             | 8         | 1,3                   | 0,052     | 29             |
| 17:30             | 9         | 1,3                   | 0,052     | 29             |
| 18:00             | 10        | 1,3                   | 0,052     | 30             |
| 18:30             | 11        | 1,4                   | 0,056     | 30             |
| 19:00             | 12        | 1,4                   | 0,056     | 31             |
| 19:30             | 13        | 1,4                   | 0,056     | 31             |
| Q total [Coulomb] | 1087,2    | Q corregida [Coulomb] |           | 907            |

Tabla 9.13 Ensayo probeta A HCF0

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 15:00             | 1         | 2,6                   | 0,104     | 23,9           |
| 15:30             | 2         | 2,8                   | 0,112     | 25,5           |
| 16:00             | 3         | 2,9                   | 0,116     | 28,1           |
| 16:30             | 4         | 3,1                   | 0,124     | 29,5           |
| 17:00             | 5         | 3,4                   | 0,136     | 32,5           |
| 17:30             | 6         | 3,4                   | 0,136     | 33,5           |
| 18:00             | 7         | 3,5                   | 0,14      | 36,1           |
| 18:30             | 8         | 3,6                   | 0,144     | 36,7           |
| 19:00             | 9         | 3,6                   | 0,144     | 37,9           |
| 19:30             | 10        | 3,7                   | 0,148     | 38,9           |
| 20:00             | 11        | 3,8                   | 0,152     | 40             |
| 20:30             | 12        | 3,9                   | 0,156     | 41,2           |
| 21:00             | 13        | 3,9                   | 0,156     | 42,3           |
| Q total [Coulomb] | 2948,4    | Q corregida [Coulomb] |           | 2460           |

Tabla 9.14 Ensayo probeta A HCF20

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 15:00             | 1         | 2,7                   | 0,108     | 25             |
| 15:30             | 2         | 2,9                   | 0,116     | 26,6           |
| 16:00             | 3         | 3,1                   | 0,124     | 29,2           |
| 16:30             | 4         | 3,2                   | 0,128     | 30,6           |
| 17:00             | 5         | 3,3                   | 0,132     | 33,6           |
| 17:30             | 6         | 3,5                   | 0,14      | 34,9           |
| 18:00             | 7         | 3,7                   | 0,148     | 37,2           |
| 18:30             | 8         | 3,8                   | 0,152     | 37,9           |
| 19:00             | 9         | 3,8                   | 0,152     | 38,8           |
| 19:30             | 10        | 3,9                   | 0,156     | 39,8           |
| 20:00             | 11        | 3,9                   | 0,156     | 40,9           |
| 20:30             | 12        | 4                     | 0,16      | 41,6           |
| 21:00             | 13        | 4,1                   | 0,164     | 42             |
| Q total [Coulomb] | 3060      | Q corregida [Coulomb] |           | 2553           |

Tabla 9.15 Ensayo Probeta A HCF40

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 15:00             | 1         | 3,1                   | 0,124     | 25             |
| 15:30             | 2         | 3,4                   | 0,136     | 27,1           |
| 16:00             | 3         | 3,7                   | 0,148     | 30,1           |
| 16:30             | 4         | 3,8                   | 0,152     | 32,5           |
| 17:00             | 5         | 4,1                   | 0,164     | 35,1           |
| 17:30             | 6         | 4,2                   | 0,168     | 37,2           |
| 18:00             | 7         | 4,4                   | 0,176     | 39,3           |
| 18:30             | 8         | 4,4                   | 0,176     | 40,5           |
| 19:00             | 9         | 4,5                   | 0,18      | 41,3           |
| 19:30             | 10        | 4,6                   | 0,184     | 42             |
| 20:00             | 11        | 4,6                   | 0,184     | 42,8           |
| 20:30             | 12        | 4,7                   | 0,188     | 43             |
| 21:00             | 13        | 4,8                   | 0,192     | 43,7           |
| Q total [Coulomb] | 3625,2    | Q corregida [Coulomb] | 3025      |                |

Tabla 9.16 Ensayo Probeta B HCF0

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 1,7                   | 0,068     | 23,9           |
| 14:00             | 2         | 1,9                   | 0,076     | 24,5           |
| 14:30             | 3         | 2                     | 0,08      | 25,7           |
| 15:00             | 4         | 2,1                   | 0,084     | 27,3           |
| 15:30             | 5         | 2,2                   | 0,088     | 28,5           |
| 16:00             | 6         | 2,3                   | 0,092     | 30,1           |
| 16:30             | 7         | 2,4                   | 0,096     | 30,8           |
| 17:00             | 8         | 2,5                   | 0,1       | 32,2           |
| 17:30             | 9         | 2,6                   | 0,104     | 33             |
| 18:00             | 10        | 2,6                   | 0,104     | 33,7           |
| 18:30             | 11        | 2,7                   | 0,108     | 34,3           |
| 19:00             | 12        | 2,7                   | 0,108     | 34,9           |
| 19:30             | 13        | 2,8                   | 0,112     | 35,4           |
| Q total [Coulomb] | 2034      | Q corregida [Coulomb] | 1697      |                |

Tabla 9.17 Ensayo probeta B HCF20

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 1,9                   | 0,076     | 23,7           |
| 14:00             | 2         | 2                     | 0,08      | 24,5           |
| 14:30             | 3         | 2,1                   | 0,084     | 26,3           |
| 15:00             | 4         | 2,4                   | 0,096     | 27,7           |
| 15:30             | 5         | 2,5                   | 0,1       | 28,5           |
| 16:00             | 6         | 2,7                   | 0,108     | 30,2           |
| 16:30             | 7         | 2,8                   | 0,112     | 31,3           |
| 17:00             | 8         | 2,9                   | 0,116     | 32,9           |
| 17:30             | 9         | 3,1                   | 0,124     | 33,8           |
| 18:00             | 10        | 3,2                   | 0,128     | 34,4           |
| 18:30             | 11        | 3,2                   | 0,128     | 35,1           |
| 19:00             | 12        | 3,3                   | 0,132     | 35,6           |
| 19:30             | 13        | 3,3                   | 0,132     | 35,9           |
| Q total [Coulomb] | 2361,6    | Q corregida [Coulomb] | 1971      |                |

Tabla 9.18 Ensayo probeta B HCF40

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 2,4                   | 0,096     | 23,7           |
| 14:00             | 2         | 2,6                   | 0,104     | 24,4           |
| 14:30             | 3         | 2,7                   | 0,108     | 25,3           |
| 15:00             | 4         | 2,8                   | 0,112     | 26             |
| 15:30             | 5         | 2,9                   | 0,116     | 27,7           |
| 16:00             | 6         | 3                     | 0,12      | 30,1           |
| 16:30             | 7         | 3,2                   | 0,128     | 31,9           |
| 17:00             | 8         | 3,4                   | 0,136     | 33,7           |
| 17:30             | 9         | 3,5                   | 0,14      | 35,3           |
| 18:00             | 10        | 3,6                   | 0,144     | 36             |
| 18:30             | 11        | 3,7                   | 0,148     | 36,5           |
| 19:00             | 12        | 3,8                   | 0,152     | 37,7           |
| 19:30             | 13        | 3,8                   | 0,152     | 38,4           |
| Q total [Coulomb] | 2757,6    | Q corregida [Coulomb] | 2301      |                |

Tabla 9.19 Ensayo probeta A HMF0

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 0,6                   | 0,024     | 22,2           |
| 14:00             | 2         | 0,7                   | 0,028     | 22,9           |
| 14:30             | 3         | 0,7                   | 0,028     | 23,6           |
| 15:00             | 4         | 0,7                   | 0,028     | 24,1           |
| 15:30             | 5         | 0,7                   | 0,028     | 25             |
| 16:00             | 6         | 0,7                   | 0,028     | 25,3           |
| 16:30             | 7         | 0,8                   | 0,032     | 25,5           |
| 17:00             | 8         | 0,8                   | 0,032     | 25,7           |
| 17:30             | 9         | 0,8                   | 0,032     | 26,2           |
| 18:00             | 10        | 0,9                   | 0,036     | 26,4           |
| 18:30             | 11        | 0,9                   | 0,036     | 26,9           |
| 19:00             | 12        | 0,9                   | 0,036     | 27,1           |
| 19:30             | 13        | 0,9                   | 0,036     | 27,3           |
| Q total [Coulomb] | 673,2     | Q corregida [Coulomb] | 562       |                |

Tabla 9.20 Ensayo probeta A HMF20

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 0,7                   | 0,028     | 21,7           |
| 14:00             | 2         | 0,8                   | 0,032     | 22,5           |
| 14:30             | 3         | 0,8                   | 0,032     | 24,9           |
| 15:00             | 4         | 0,8                   | 0,032     | 25,3           |
| 15:30             | 5         | 0,9                   | 0,036     | 26,4           |
| 16:00             | 6         | 0,9                   | 0,036     | 27,1           |
| 16:30             | 7         | 0,9                   | 0,036     | 27,8           |
| 17:00             | 8         | 0,9                   | 0,036     | 30,3           |
| 17:30             | 9         | 1                     | 0,04      | 30,8           |
| 18:00             | 10        | 1                     | 0,04      | 32,2           |
| 18:30             | 11        | 1                     | 0,04      | 33,2           |
| 19:00             | 12        | 1,1                   | 0,044     | 33,5           |
| 19:30             | 13        | 1,1                   | 0,044     | 35             |
| Q total [Coulomb] | 792       | Q corregida [Coulomb] | 661       |                |

Tabla 9.21 Ensayo probeta A HMF40

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 0,9                   | 0,036     | 21,6           |
| 14:00             | 2         | 0,9                   | 0,036     | 22,5           |
| 14:30             | 3         | 0,9                   | 0,036     | 23,4           |
| 15:00             | 4         | 1                     | 0,04      | 24,5           |
| 15:30             | 5         | 1                     | 0,04      | 24,8           |
| 16:00             | 6         | 1                     | 0,04      | 25             |
| 16:30             | 7         | 1                     | 0,04      | 25,7           |
| 17:00             | 8         | 1                     | 0,04      | 25,9           |
| 17:30             | 9         | 1,1                   | 0,044     | 26,2           |
| 18:00             | 10        | 1,1                   | 0,044     | 26,7           |
| 18:30             | 11        | 1,1                   | 0,044     | 27             |
| 19:00             | 12        | 1,1                   | 0,044     | 27,5           |
| 19:30             | 13        | 1,2                   | 0,048     | 28,3           |
| Q total [Coulomb] | 882       | Q corregida [Coulomb] |           | 736            |

Tabla 9.22 Ensayo probeta B HMF0

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 0,5                   | 0,02      | 21,9           |
| 14:00             | 2         | 0,6                   | 0,024     | 22,1           |
| 14:30             | 3         | 0,6                   | 0,024     | 22,7           |
| 15:00             | 4         | 0,7                   | 0,028     | 23,2           |
| 15:30             | 5         | 0,7                   | 0,028     | 2,7            |
| 16:00             | 6         | 0,7                   | 0,028     | 23,9           |
| 16:30             | 7         | 0,7                   | 0,028     | 24,7           |
| 17:00             | 8         | 0,7                   | 0,028     | 25,3           |
| 17:30             | 9         | 0,7                   | 0,028     | 25,7           |
| 18:00             | 10        | 0,7                   | 0,028     | 26,1           |
| 18:30             | 11        | 0,8                   | 0,032     | 26,4           |
| 19:00             | 12        | 0,8                   | 0,032     | 26,9           |
| 19:30             | 13        | 0,8                   | 0,032     | 27,3           |
| Q total [Coulomb] | 601,2     | Q corregida [Coulomb] |           | 502            |

Tabla 9.23 Ensayo probeta B HMF20

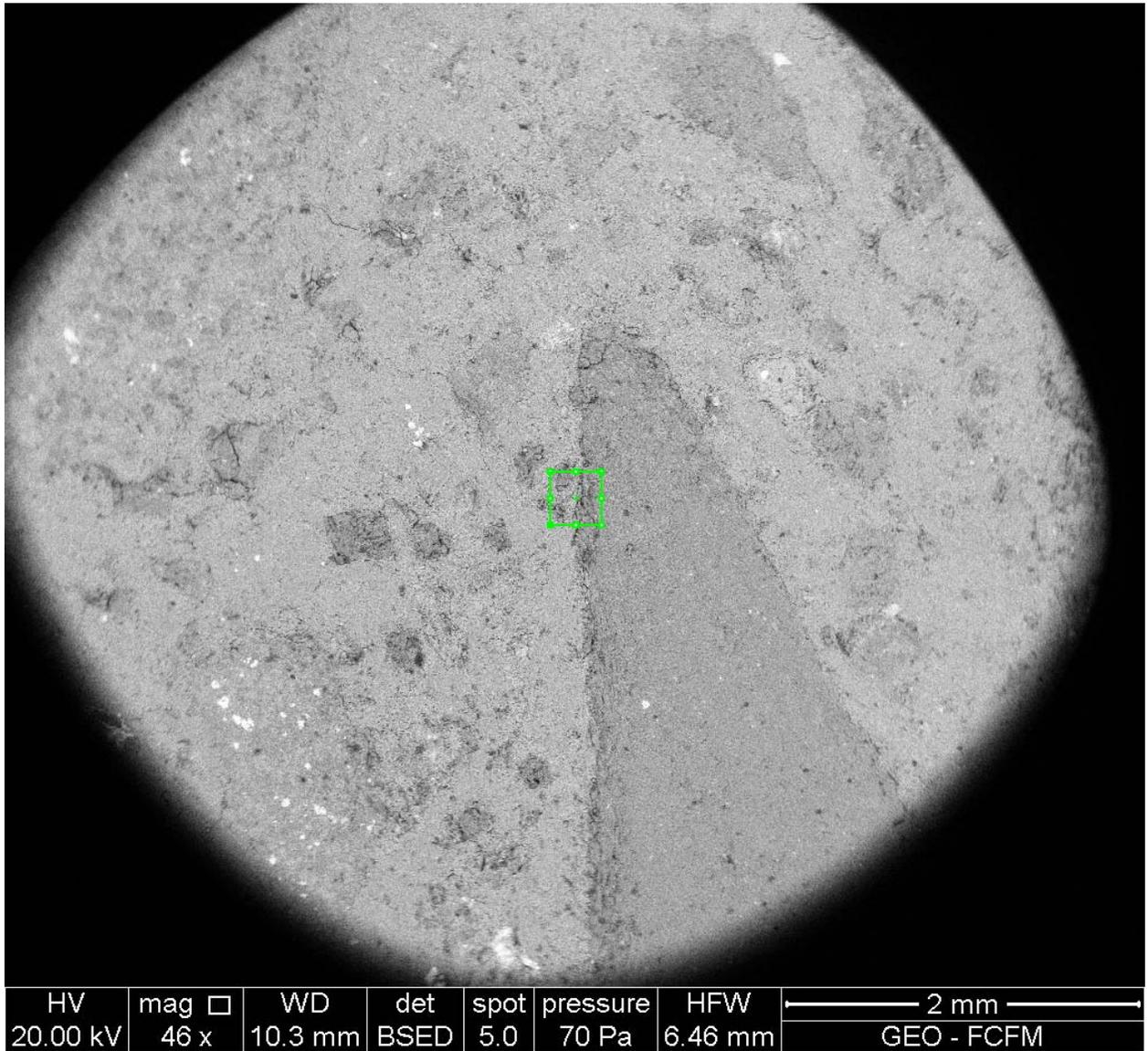
| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 0,6                   | 0,024     | 21,8           |
| 14:00             | 2         | 0,6                   | 0,024     | 22,1           |
| 14:30             | 3         | 0,6                   | 0,024     | 23,2           |
| 15:00             | 4         | 0,6                   | 0,024     | 23,7           |
| 15:30             | 5         | 0,7                   | 0,028     | 23,9           |
| 16:00             | 6         | 0,7                   | 0,028     | 24,1           |
| 16:30             | 7         | 0,7                   | 0,028     | 24,7           |
| 17:00             | 8         | 0,7                   | 0,028     | 25,1           |
| 17:30             | 9         | 0,7                   | 0,028     | 25,6           |
| 18:00             | 10        | 0,8                   | 0,032     | 26             |
| 18:30             | 11        | 0,8                   | 0,032     | 26,3           |
| 19:00             | 12        | 0,9                   | 0,036     | 26,9           |
| 19:30             | 13        | 0,9                   | 0,036     | 27,1           |
| Q total [Coulomb] | 615,6     | Q corregida [Coulomb] | 514       |                |

Tabla 9.24 Ensayo probeta B HMF40

| Hora              | N Lectura | Lectura mA            | Lectura V | Temperatura °C |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------|
| 13:30             | 1         | 0,6                   | 0,024     | 21,8           |
| 14:00             | 2         | 0,6                   | 0,024     | 22,1           |
| 14:30             | 3         | 0,6                   | 0,024     | 23,2           |
| 15:00             | 4         | 0,6                   | 0,024     | 23,7           |
| 15:30             | 5         | 0,7                   | 0,028     | 23,9           |
| 16:00             | 6         | 0,7                   | 0,028     | 24,1           |
| 16:30             | 7         | 0,7                   | 0,028     | 24,8           |
| 17:00             | 8         | 0,8                   | 0,032     | 25,2           |
| 17:30             | 9         | 0,8                   | 0,032     | 25,7           |
| 18:00             | 10        | 0,9                   | 0,036     | 26             |
| 18:30             | 11        | 0,9                   | 0,036     | 26,4           |
| 19:00             | 12        | 0,9                   | 0,036     | 26,8           |
| 19:30             | 13        | 1                     | 0,04      | 27,2           |
| Q total [Coulomb] | 648       | Q corregida [Coulomb] | 541       |                |

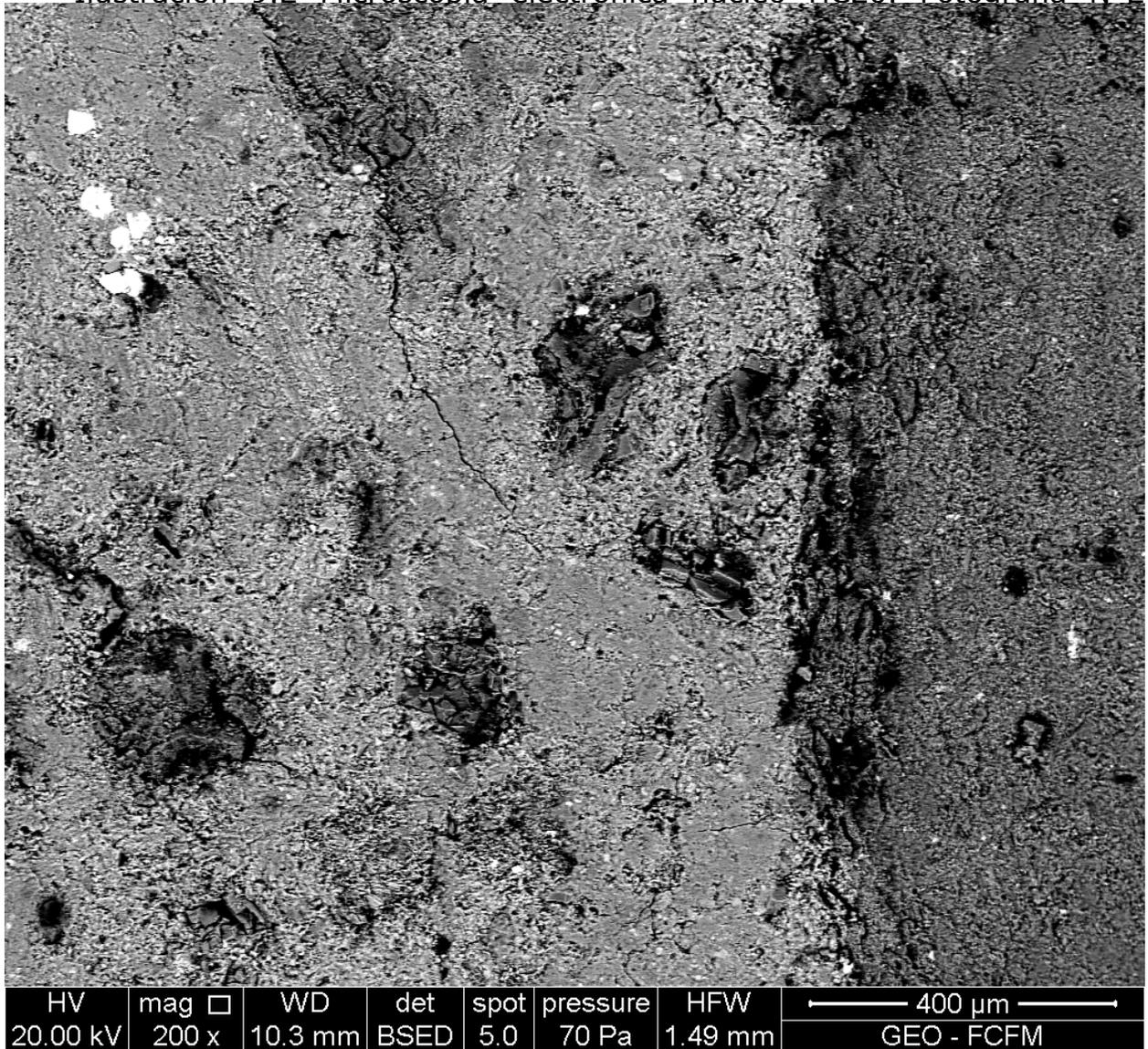
## 9.2 Microscopía electrónica

Ilustración 9.1 Microscopia electrónica núcleo HC20. Fotografía N°1.



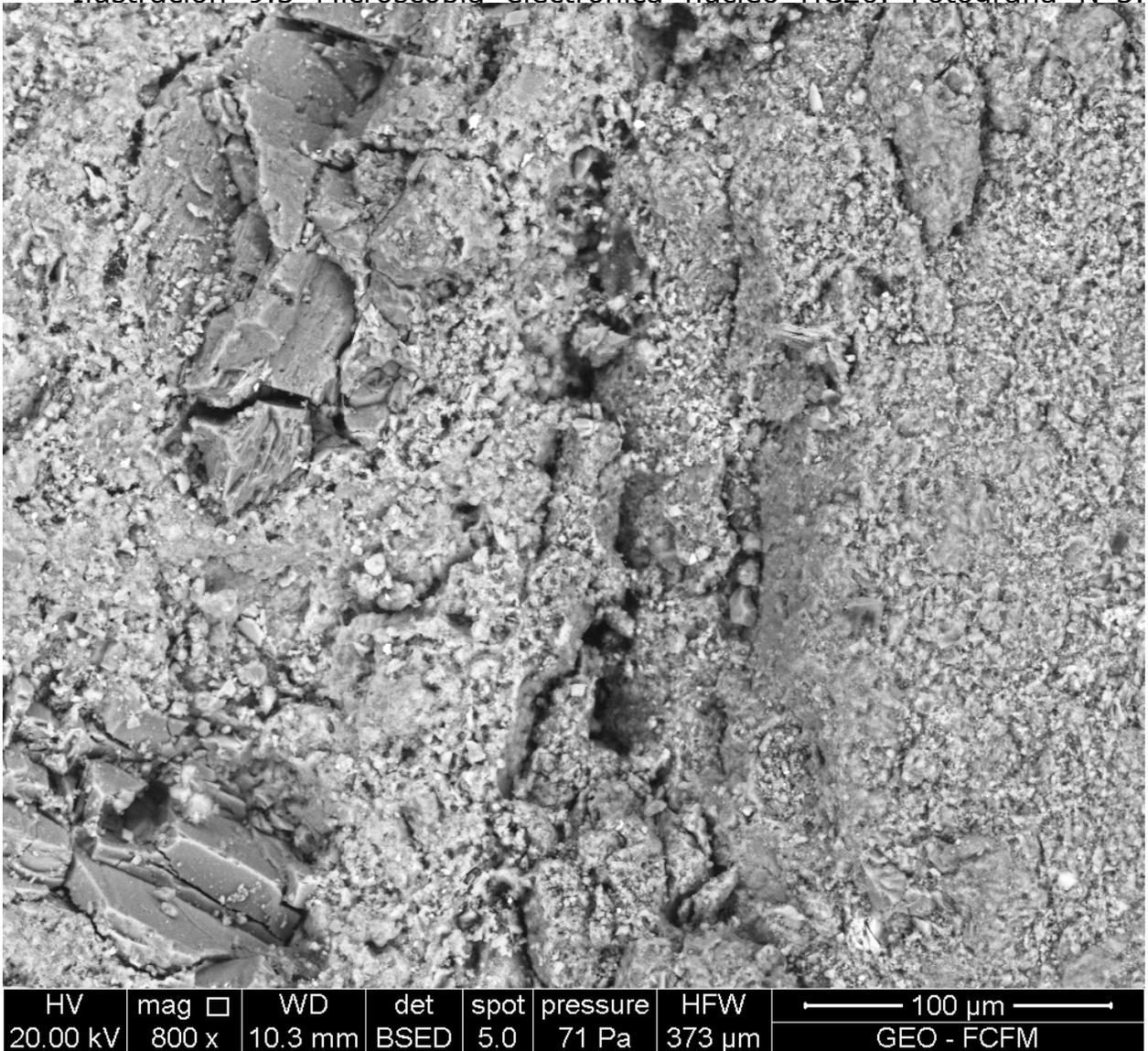
Se aprecia interfaz árido/matriz. Existe porosidad capilar.

Ilustración 9.2 Microscopia electrónica núcleo HC20. Fotografía N°2



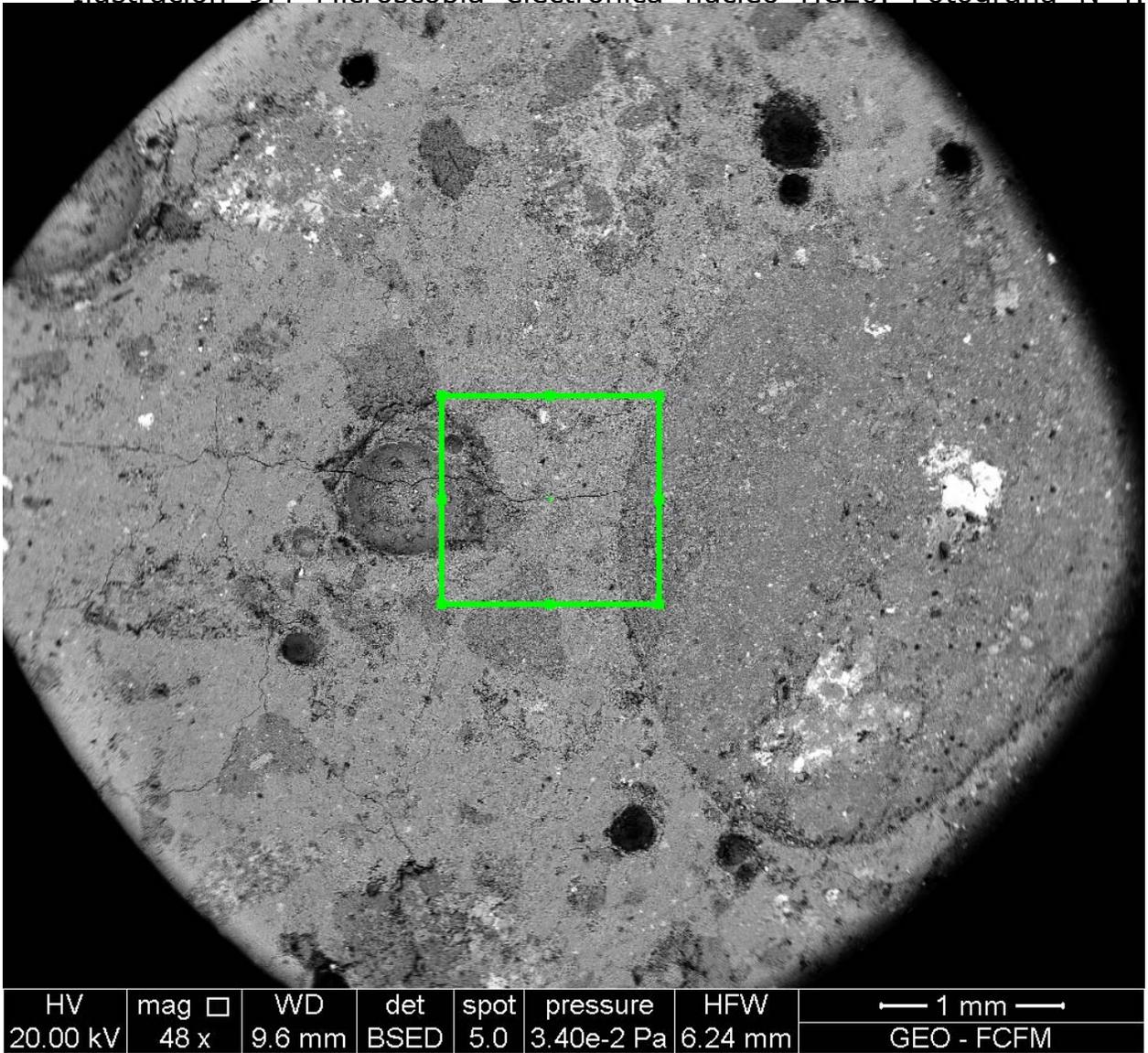
se realiza zoom a la interfaz árido/matriz. Se aprecia porosidad capilar con mayor detalle, microfisuración, vacíos de aire.

Ilustración 9.3 Microscopia electrónica núcleo HC20. Fotografía N°3.



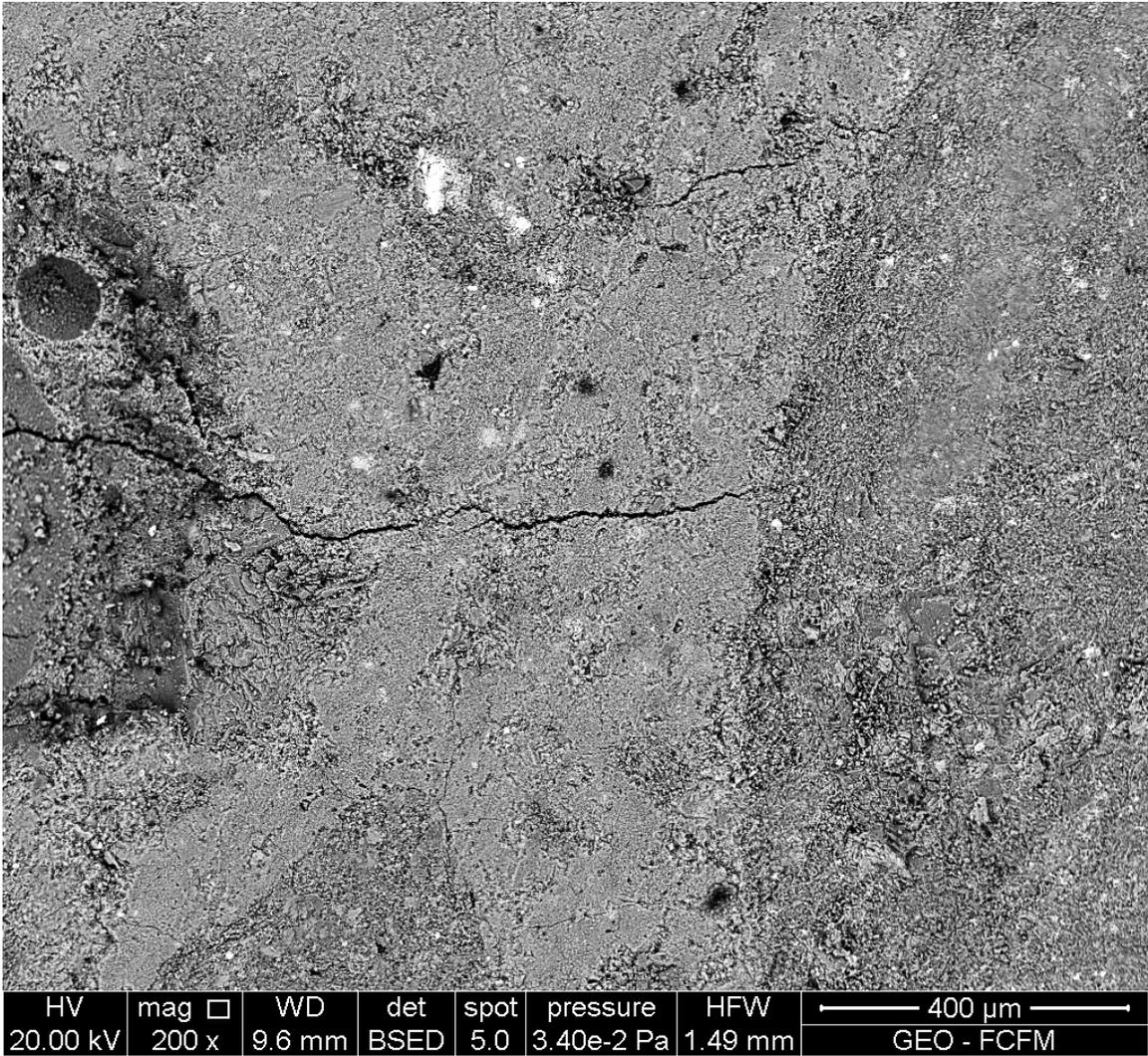
Se realiza zoom a la interfaz árido/matriz. Se aprecia porosidad capilar alta, microfisuración.

Ilustración 9.4 Microscopia electrónica núcleo HC20. Fotografía N°4.



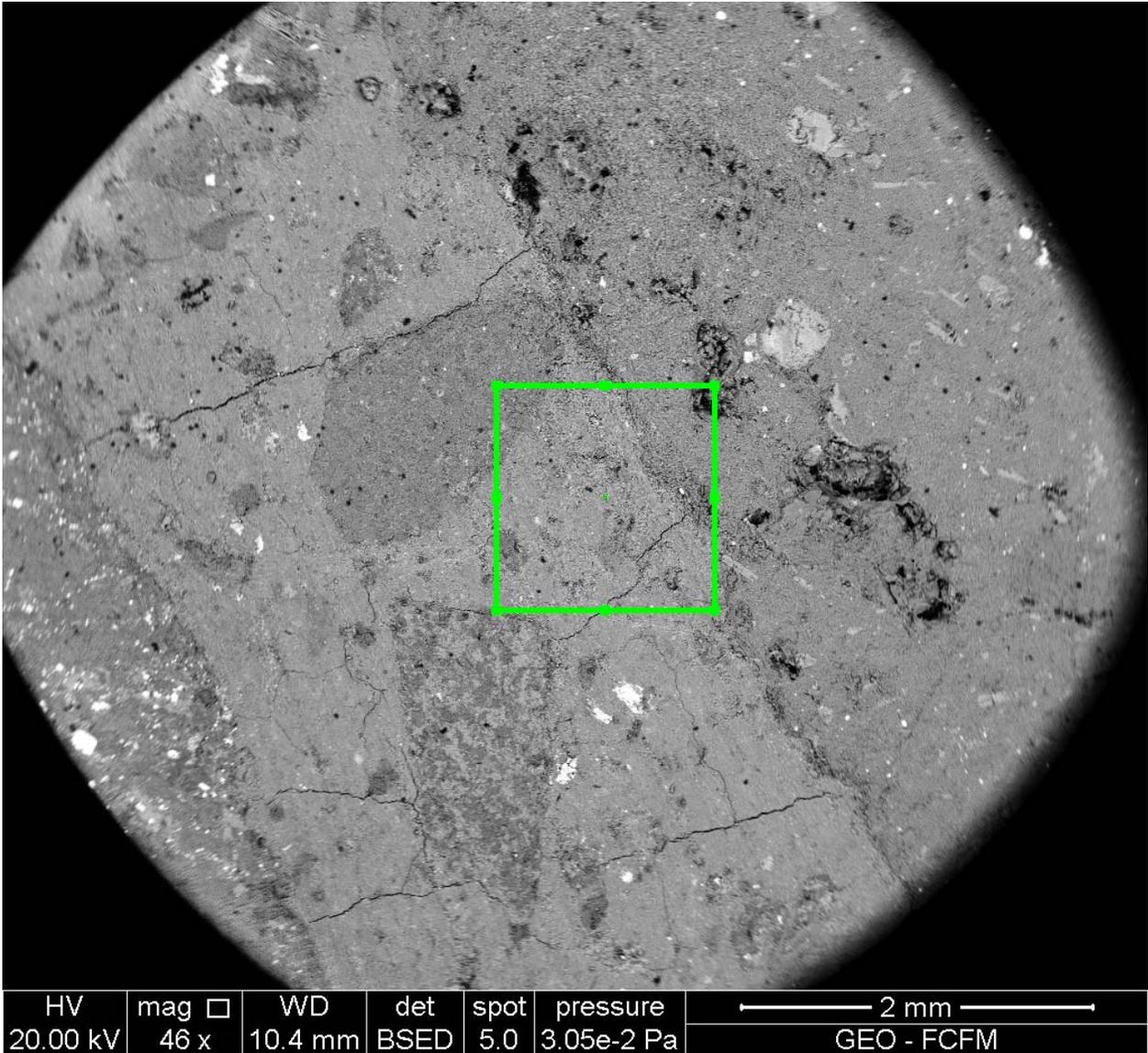
Se aprecia interfaz árido/matriz. Existe porosidad capilar y microfisuración.

Ilustración 9.5 Microscopia electrónica núcleo HC20. Fotografía N°5.



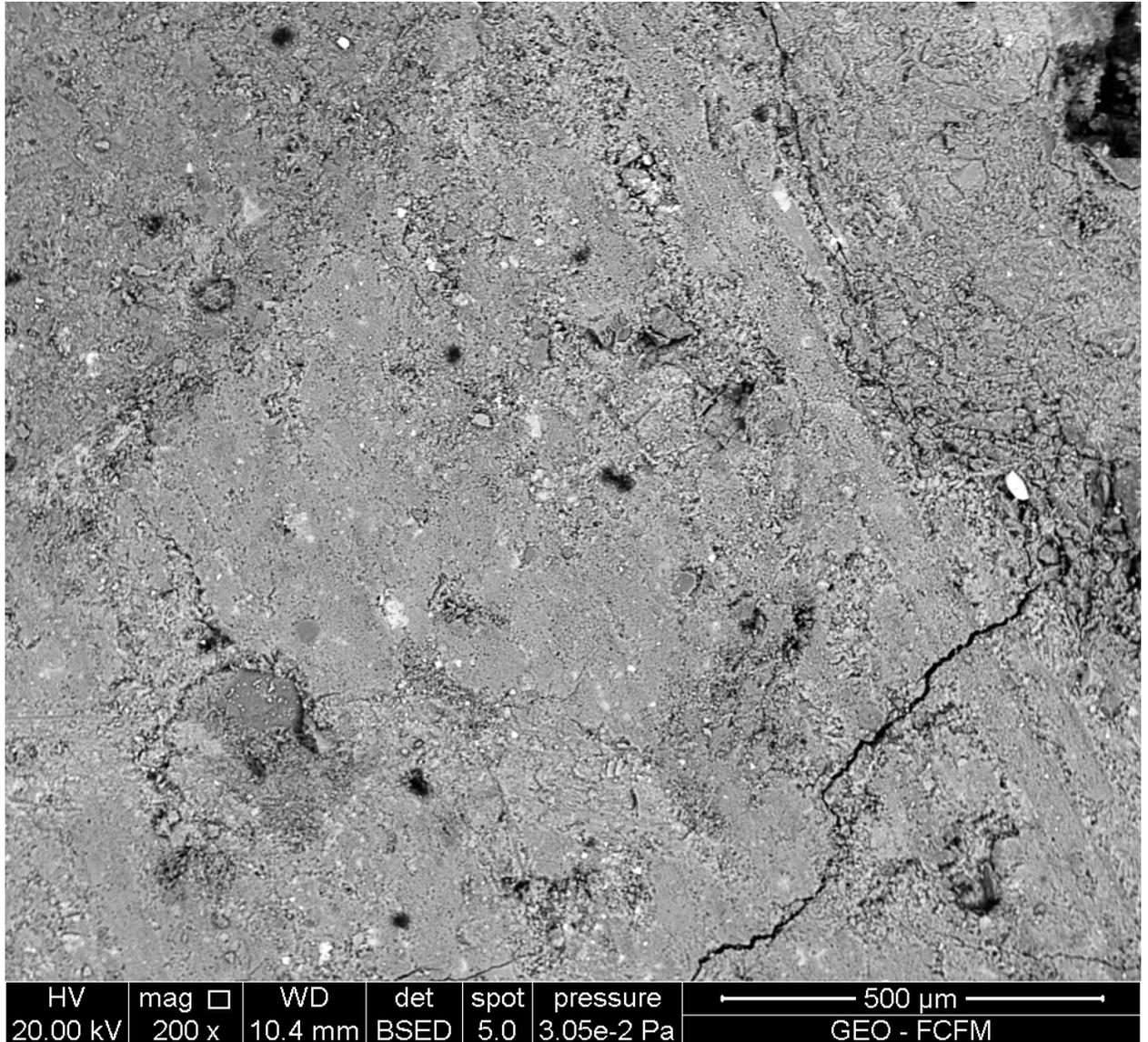
Se realiza zoom a la interfaz árido/matriz. Se aprecia el inicio y propagación de la fisura desde el árido hacia la matriz.

Ilustración 9.6 Microscopia electrónica núcleo HM20. Fotografía N°1.



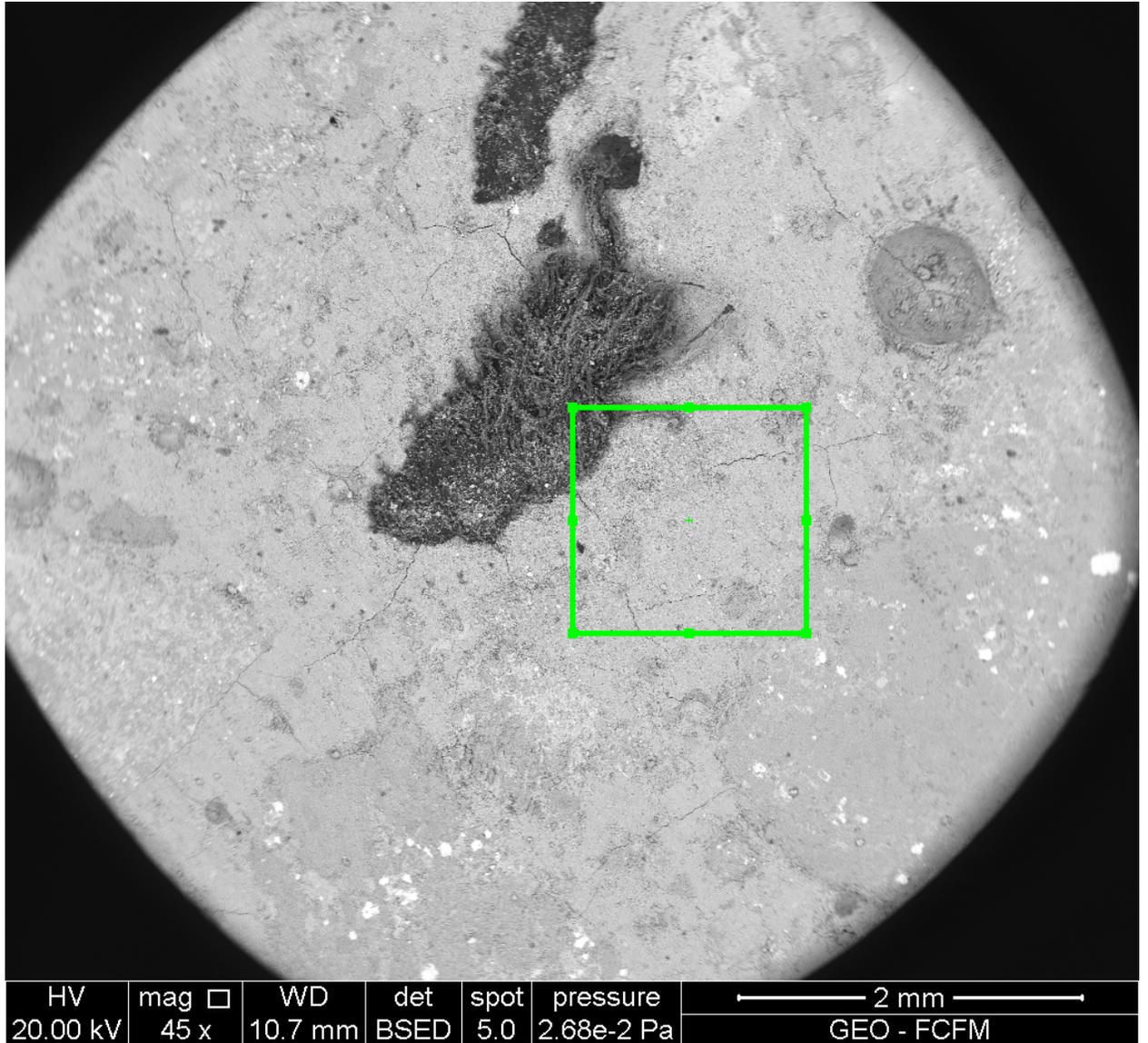
Se aprecia interfaz árido/matriz. Microfisuración, porosidad capilar baja.

Ilustración 9.7 Microscopia electrónica núcleo HM20. Fotografía N°2.



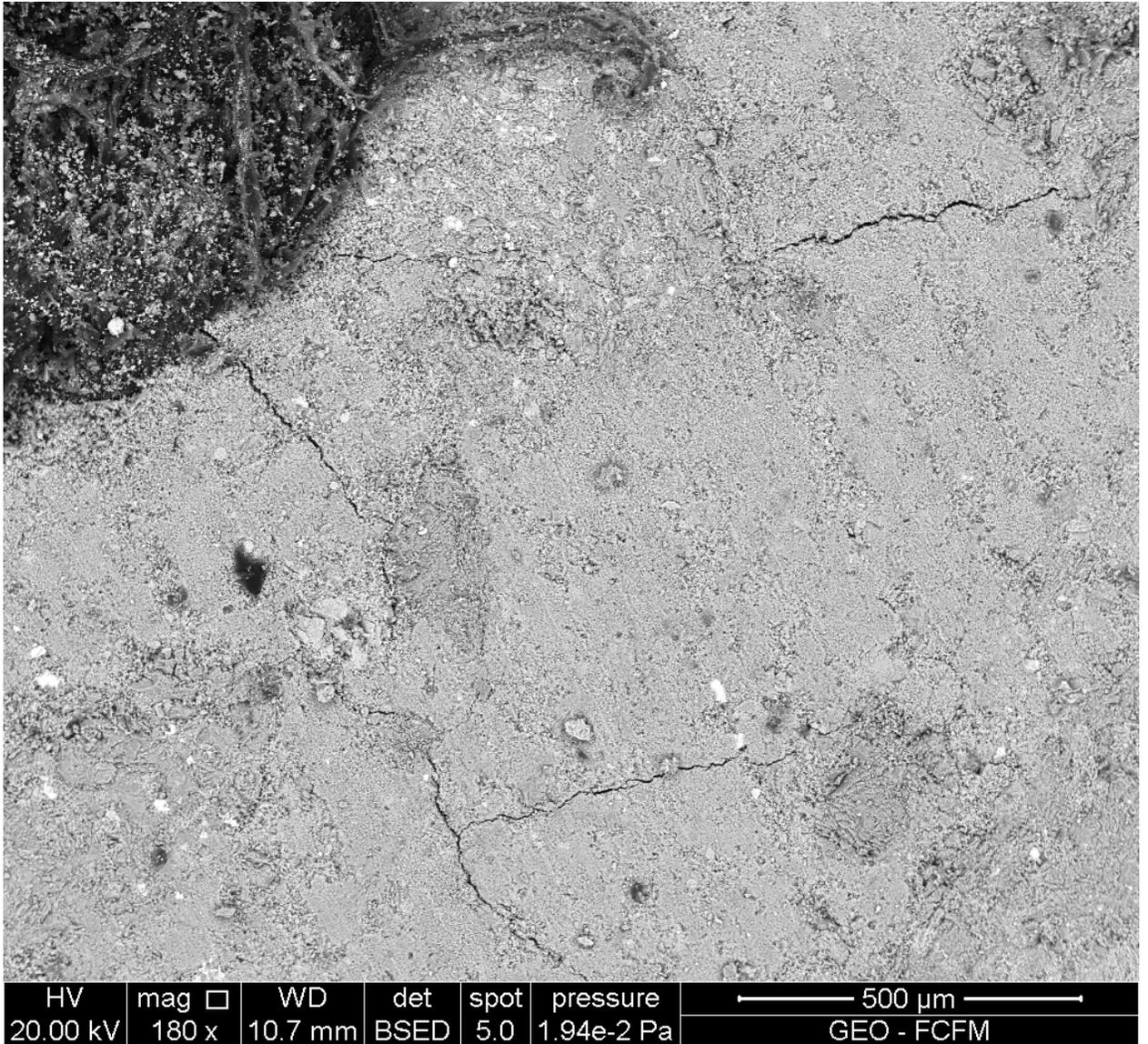
Se realiza zoom a la interfaz árido/matriz. Se aprecia el inicio y propagación de la fisura desde el árido hacia la matriz, porosidad capilar baja.

Ilustración 9.8 Microscopia electrónica núcleo HCF20. Fotografía N°1.



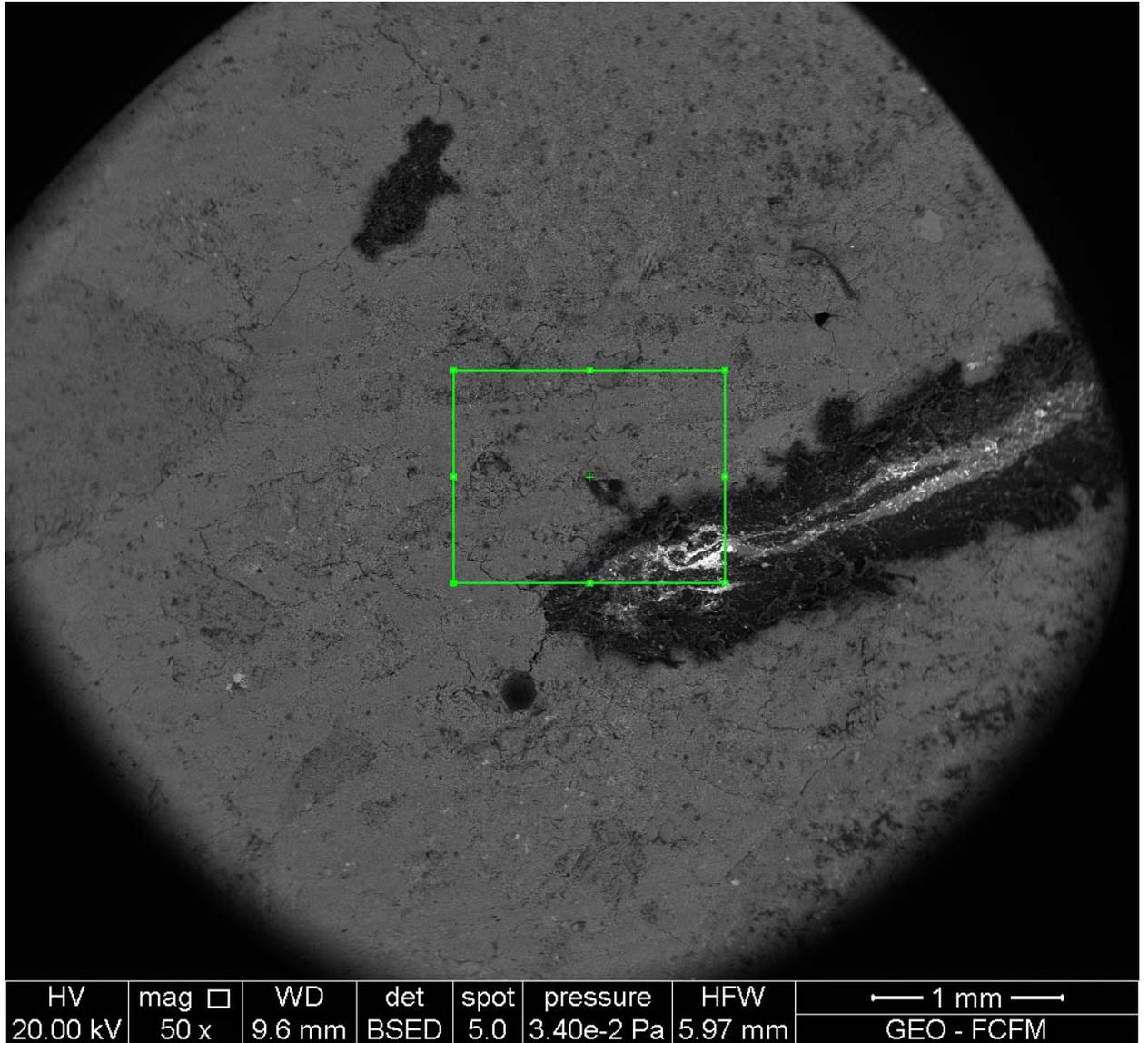
Se aprecia interfaz fibra/matriz. Microfisuración, porosidad capilar

Ilustración 9.9 Microscopia electrónica núcleo HCF20. Fotografía N°2.



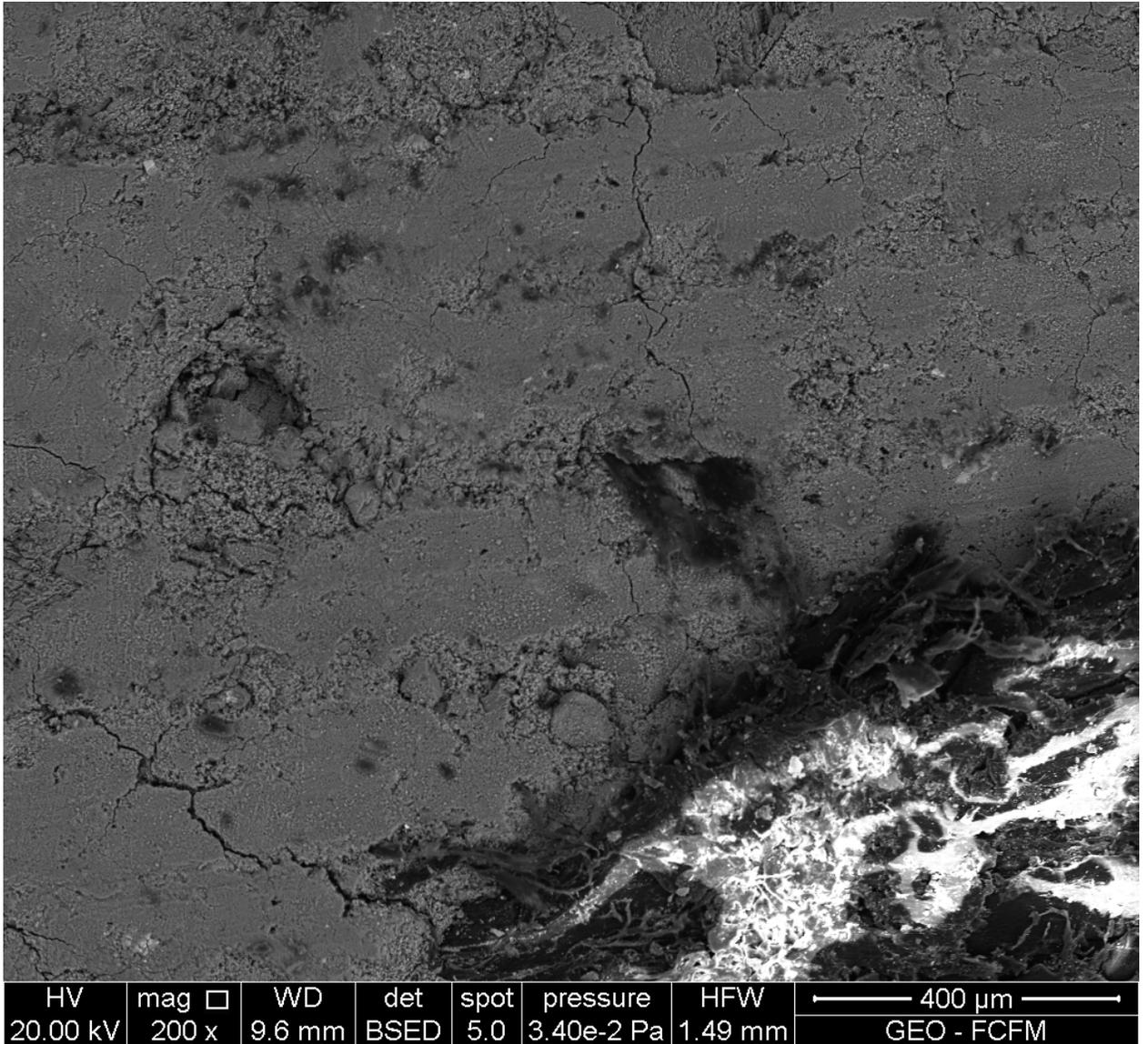
Se realiza zoom a la interfaz fibra/matriz. Se aprecia microfisuración.

Ilustración 9.10 Microscopia electrónica núcleo HCF20. Fotografía N°3.



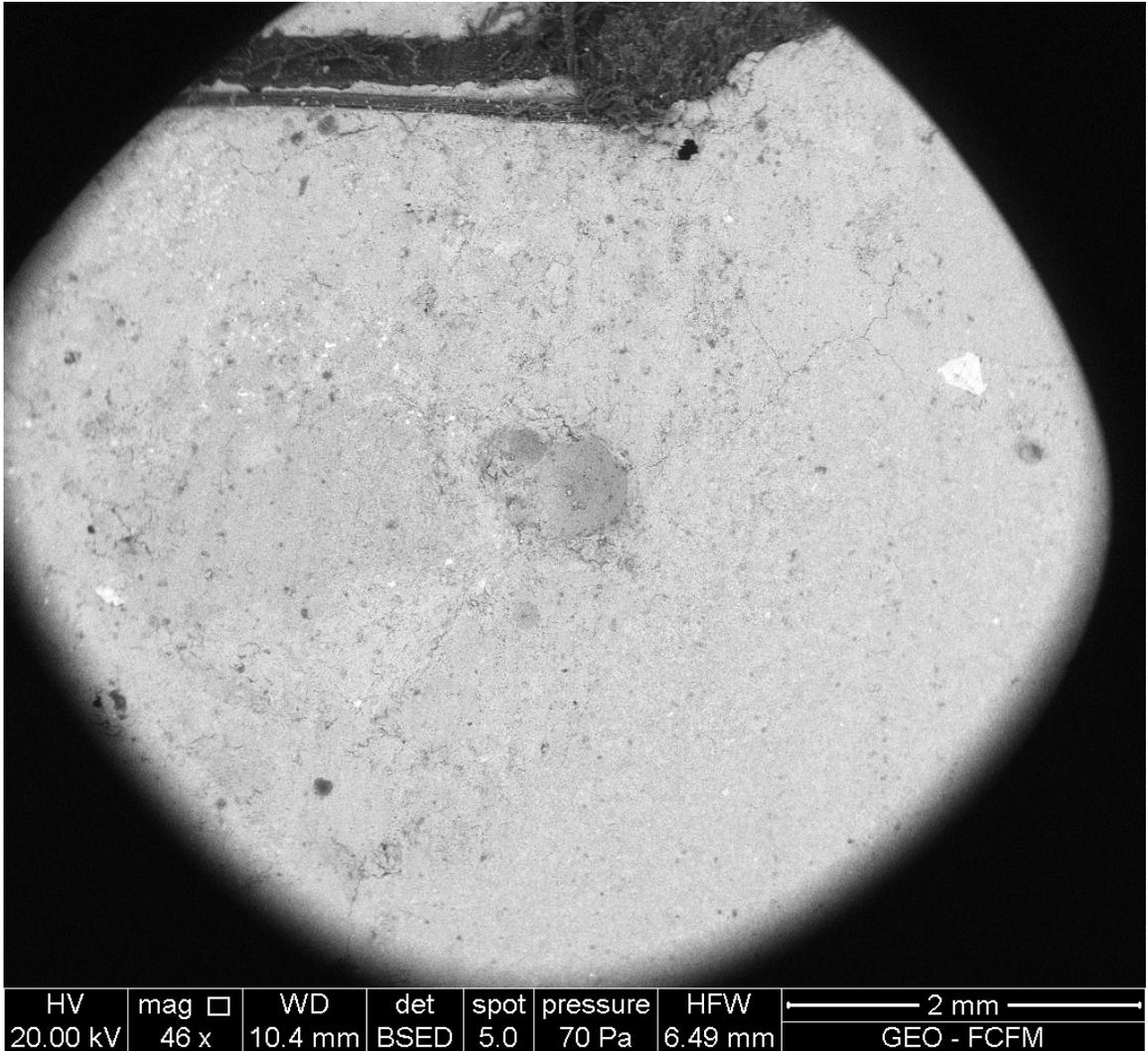
Se aprecia interfaz fibra/matriz. Microfisuración, porosidad capilar

Ilustración 9.11 Microscopia electrónica núcleo HCF20. Fotografía N°4.



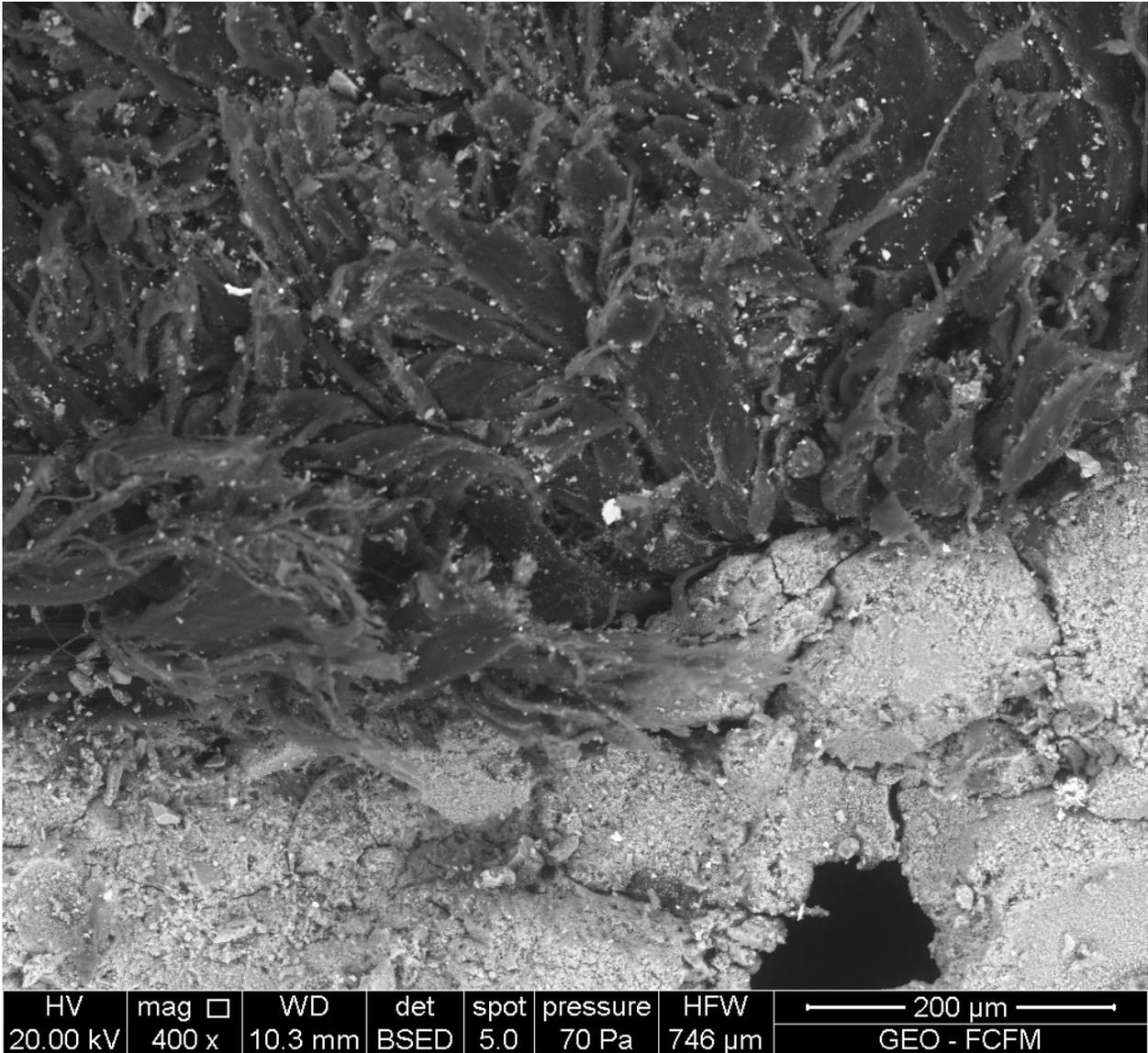
Se realiza zoom a la interfaz fibra/matriz. Se aprecia microfisuración, porosidad alta.

Ilustración 9.12 Microscopia electrónica núcleo HMF20. Fotografía N°1.



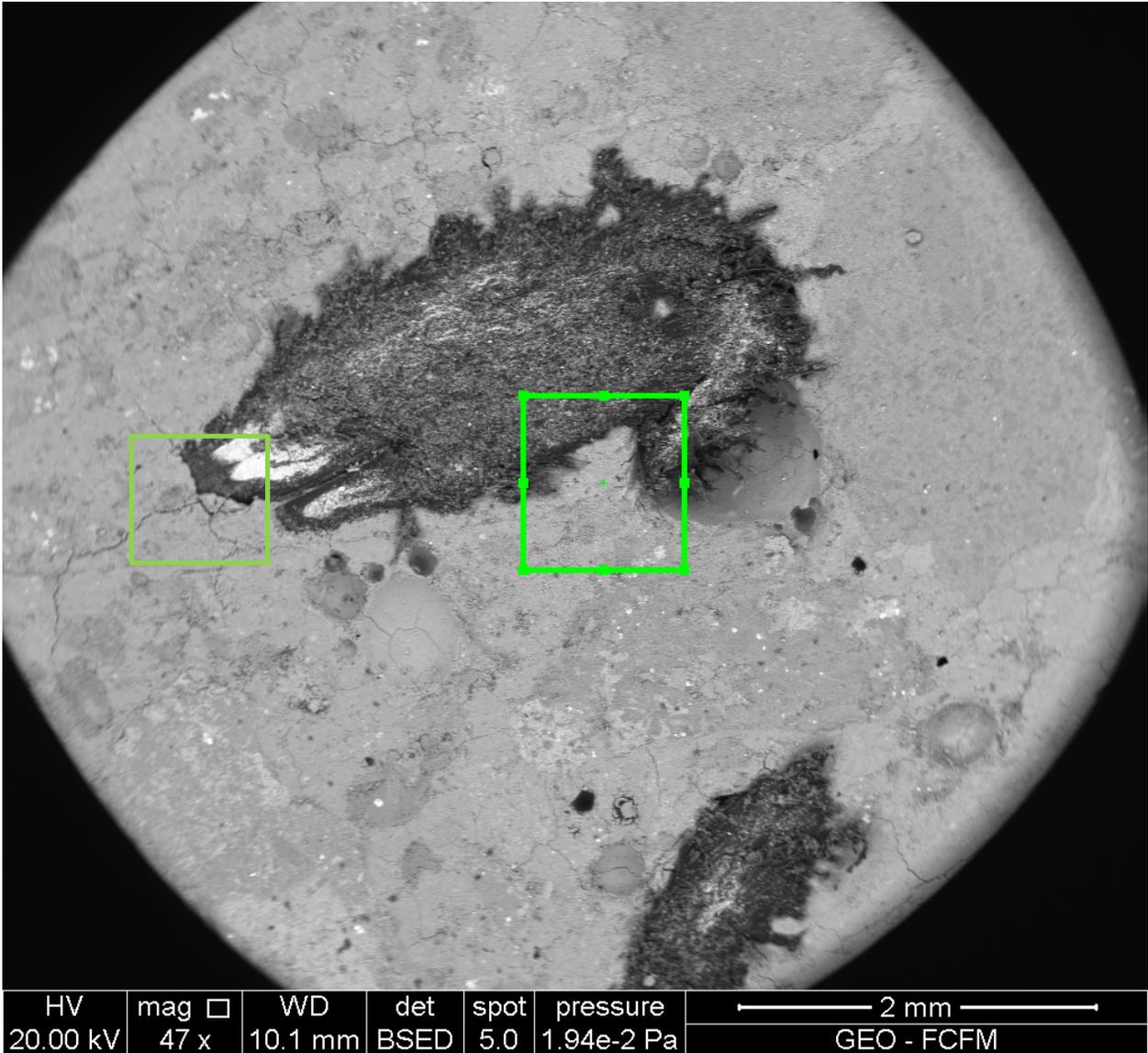
Se aprecia interfaz fibra/matriz. Microfisuración, porosidad capilar baja.

Ilustración 9.13 Microscopia electrónica núcleo HMF20. Fotografía N°2.



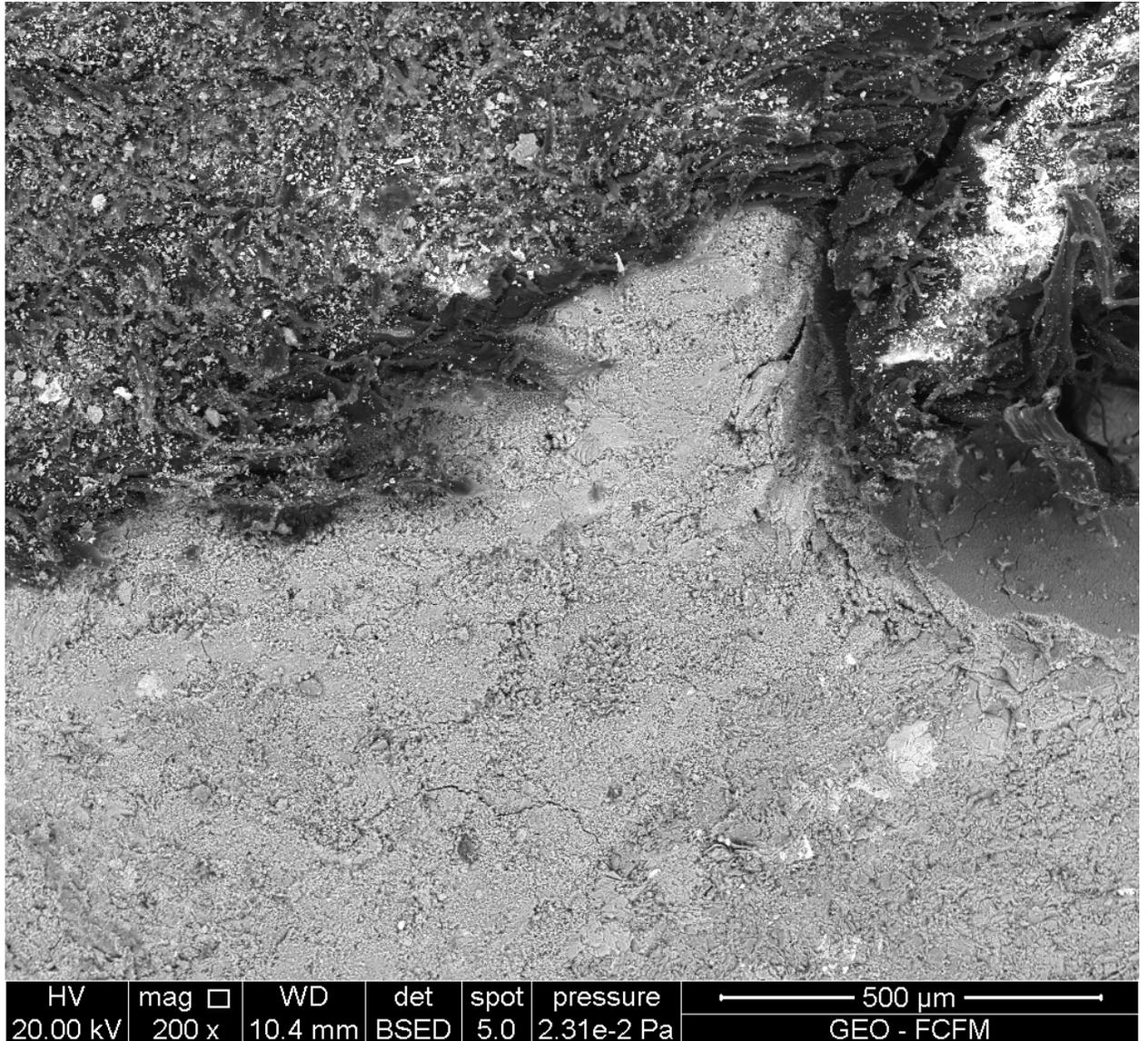
Se realiza zoom a la interfaz fibra/matriz. Se aprecia microfisuración alta.

Ilustración 9.14 Microscopia electrónica núcleo HMF20. Fotografía N°3.



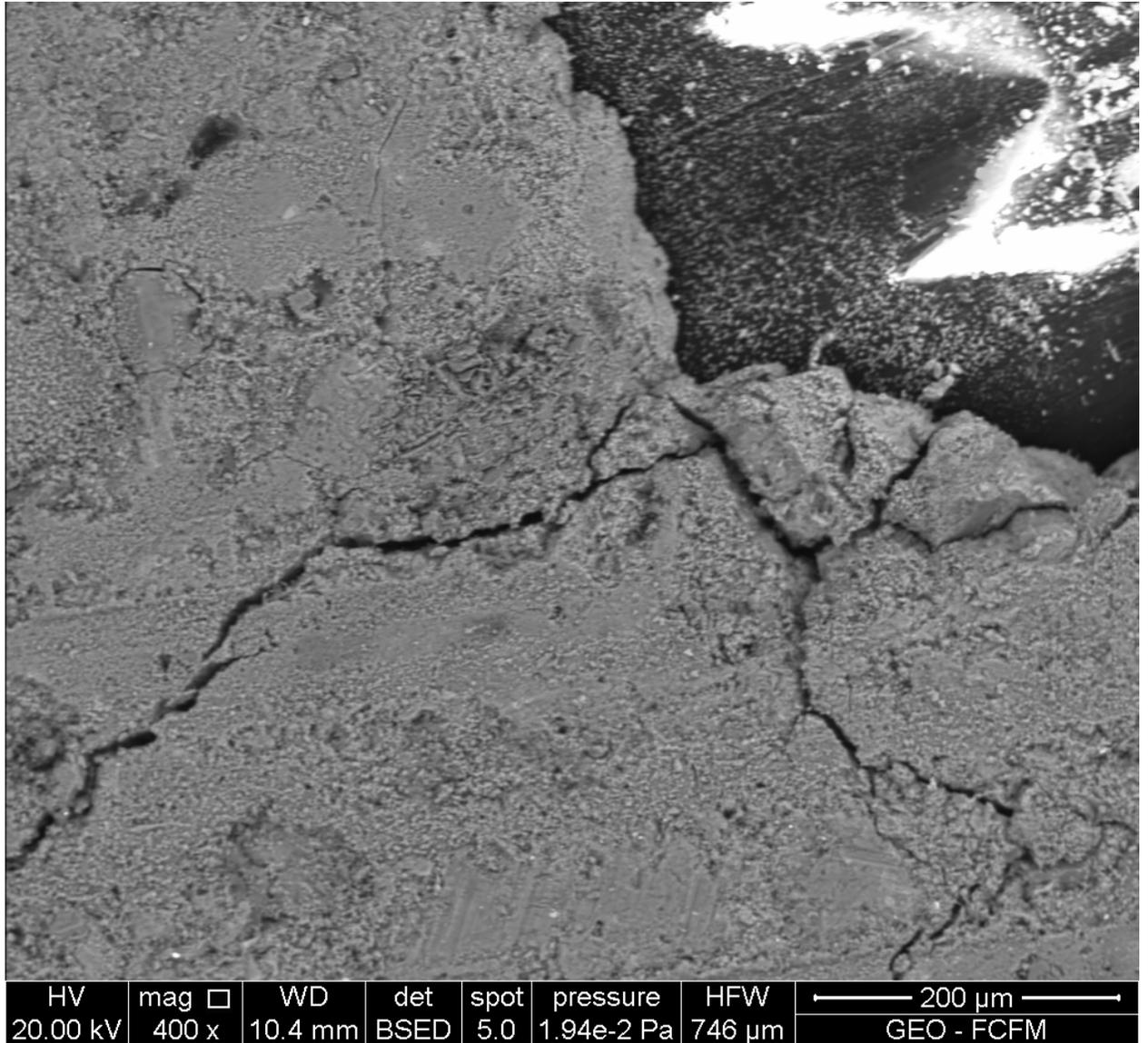
Se aprecia interfaz fibra/matriz. Microfisuración, porosidad capilar baja.

Ilustración 9.15 Microscopia electrónica núcleo HMF20. Fotografía N°4.



Se realiza zoom a la interfaz fibra/matriz. Se aprecia microfisuración alta, interfaz presenta vacíos.

Ilustración 9.16 Microscopia electrónica núcleo HMF20. Fotografía N°5



Se realiza zoom a la interfaz fibra/matriz. Se aprecia microfisuración alta, matriz compacta, porosidad baja.