



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA
ÁREA TECNOLÓGICA**

TESIS DE MAESTRÍA

**ESTUDIO DE LA INTERFAZ FIBRA-MATRIZ EN
COMPUESTOS DE MATRIZ CEMENTÍCIA REFORZADA
CON FIBRAS METÁLICAS**

Arq. Iliana Rodríguez Viacava

TUTOR: Dra. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale

**Montevideo, Uruguay
Febrero de 2022**

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Arq. Juan José Fontana

Dr. Ing. Luis Segura Castillo

Dr. Ing. Antonio Aguado de Cea

Agradecimientos:

Hay muchas personas e Instituciones a quien agradecer, que me han apoyado y acompañado en este camino y que de no ser por todo ello no hubiera sido posible llegar a esta instancia.

Primero que nada, quiero agradecer a Gemma Rodríguez de Sensale por haberme guiado, acompañado y aconsejado no solamente en este período de desarrollo de la Tesis, sino desde muchos años antes.

A la Universidad de la República, por haberme otorgado una beca del programa "Becas de apoyo a docentes para estudios de posgrado" de la Comisión Académica de Posgrado, así como los medios y el tiempo para poder llevar adelante todo este trabajo. Especialmente quiero agradecer a mis compañeros de Estructuras 1 (FADU) y del Instituto de Ensayo de Materiales (FING) por el apoyo que recibí para poder destinar horas de trabajo al desarrollo de la Tesis, viéndose sobrecargados en algunos momentos.

Además, quisiera agradecer a algunas empresas del medio que donaron los materiales empleados en esta Tesis, quienes siempre me recibieron con muy buena disposición: Cementos Artigas, Concrexur, Sika, SAIMA.

Finalmente, y de manera muy especial a toda mi familia, pero en particular a mis padres por haberme apoyado durante toda la vida y a Juan Pablo y Sofía que han sido un apoyo muy grande en el día a día.

RESUMEN

La principal cualidad del hormigón es su excelente resistencia a la compresión, sin embargo, tiene una baja resistencia a tracción y un comportamiento frágil y brusco en el momento de la rotura. Por lo cual, cuando el hormigón es sometido a fuerzas de tracción se fisura casi inmediatamente. Debido a ello, en el diseño de piezas para uso estructural se debe recurrir al refuerzo con barras de acero. El hormigón reforzado con fibras de acero cortas distribuidas aleatoriamente se presenta como una oportunidad para mejorar su desempeño frente a esfuerzos de tracción, evitando o retardando la propagación de fisuras y distribuyéndolas de una manera uniforme. Por lo cual, como todo material compuesto su buen desempeño está estrechamente ligado a la unión o interfaz entre la fibra y la matriz (F-M).

El objetivo propuesto en el presente trabajo de investigación, fue analizar la interfaz F-M en compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras metálicas de manera de identificar los parámetros y propiedades que gobiernan la unión entre ambos materiales, en busca de mecanismos que mejoren dicha unión.

La metodología adoptada consistió en utilizar dos matrices correspondientes a un microhormigón de resistencia normal (40 MPa – MH1) y un microhormigón de alto desempeño (60 MPa – MH2), con incorporación de cuatro contenidos de microfibra polimérica (0%, 0,05%, 0,10% y 0,15% MF), y macrofibras fibras de acero con extremos rectos y con gancho. Se realizó un análisis a diferentes escalas de la interfaz F-M. A escala macroestructural, mediante la evaluación del comportamiento mecánico de ambos tipos de fibras a través del ensayo de pullout, en base a las dos configuraciones diferentes “single-sided test” con una fibra aislada (D1) y “doble-sided test” con un conjunto de 16 fibras (D2). Donde a través del análisis de la relación entre la carga de pullout vs. el desplazamiento de la/s fibra/s, se evidencian los diferentes mecanismos de unión de la interfaz F-M (adherencia química, fricción, anclaje mecánico). A escala microestructural, se realizaron y analizaron imágenes obtenidas con Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) del surco dejado por la fibra en la matriz una vez arrancada, de la superficie de la fibra, y de la zona de transición (ZdeT) entre F-M. Finalmente, se estableció una correlación entre ambas escalas de análisis.

Los resultados obtenidos muestran una fuerte incidencia del tipo de matriz en los diferentes mecanismos de unión de la interfaz F-M, para ambos tipos de fibra y configuraciones de ensayo (D1 y D2). Las mezclas de la matriz MH2 presentan mejores resultados frente a las mezclas MH1, en cuanto a la adherencia química F-M, anclaje mecánico, fuerza de fricción y energía de pullout. La incorporación en la matriz de un 0,15% de microfibras poliméricas, mejoró las prestaciones en los mismos mecanismos de unión señalados, e incluso con 0,10%MF presentó mejoras en algunos casos particulares. Además, el análisis realizado permitió identificar diferentes etapas del comportamiento de extracción por pullout y los mecanismos de unión de la interfaz F-M asociados a ellas, según el tipo de fibra de acero utilizada. En particular, en cuanto a los resultados encontrados relativos al mecanismo de adherencia química entre F-M, se vieron reafirmados con las evidencias encontradas en el análisis a escala microestructural de las imágenes MEB.

Palabras-clave:

Microhormigón reforzado con fibras, interfaz fibra-matriz, mecanismos de unión, comportamiento en pullout, fibras de acero.

ÍNDICE

| | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Índice de Figuras y Tablas | IV |
| Símbolos y abreviaciones | X |
| Capítulo 1 – Introducción | 01 |
| 1.1. Significancia del estudio de Hormigones Reforzados con Fibras en obras de Arquitectura | 01 |
| 1.2. Objetivos | 07 |
| 1.3. Estructura de la Tesis de Maestría | 07 |
| 1.4. Alcance de la investigación | 07 |
| Capítulo 2 – Estado del Arte | 09 |
| 2.1. Estado del arte de los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF) | 09 |
| 2.2. Estado del arte de las técnicas de caracterización de la interfaz fibra-matriz en compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras | 11 |
| 2.3. Síntesis relativa al ensayo de pullout de fibras | 33 |
| 2.4. Recomendaciones y normas de referencia en HRF a nivel internacional | 40 |
| Capítulo 3 – Investigación experimental | 41 |
| 3.1. Metodología | 41 |
| 3.2. Materiales | 42 |
| 3.2.1 Cemento Pórtland | 44 |
| 3.2.2 Agregado Fino | 45 |
| 3.2.3 Agua | 47 |
| 3.2.4 Aditivo | 47 |
| 3.2.5 Macrofibras de acero | 47 |
| 3.2.6 Microfibras poliméricas | 52 |
| 3.3. Métodos | 52 |
| 3.3.1 Matriz cementicia | 53 |
| 3.3.1.1 Preparación de mezclas | 53 |
| 3.3.1.2 Estado fresco: Consistencia | 54 |
| 3.3.1.3 Estado endurecido: resistencia a flexión y compresión | 55 |
| 3.3.2 Interfaz fibra-matriz | 56 |
| 3.3.2.1 Análisis a escala macroestructural: ensayo pullout | 56 |
| 3.3.2.2 Análisis a escala microestructural: MEB | 68 |
| 3.4. Análisis estadístico | 73 |
| Capítulo 4 – Resultados y discusión | 74 |
| 4.1. Matriz Cementicia | 74 |
| 4.1.1 Estado fresco: Consistencia | 74 |
| 4.1.2 Estado endurecido: resistencia a flexión y compresión | 75 |
| 4.2. Interfaz fibra-matriz | 75 |
| 4.2.1 Análisis a escala macroestructural: ensayo pullout | 75 |
| 4.2.1.1 Resultados del ensayo de pullout para la configuración de fibra aislada (Dispositivo D1) | 76 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.1.2 Resultados del ensayo de pullout para la configuración de un grupo de 16 fibras (Dispositivo D2) | 88 |
| 4.2.2 Análisis a escala microestructural: MEB | 102 |
| 4.2.3 Correlación de resultados a nivel macro y microestructura | 124 |
| Capítulo 5 – Conclusiones | 131 |
| 5.1. Conclusiones | 131 |
| 5.2. Propuestas a futuro | 134 |
| Referencias Bibliográficas | 135 |
| ANEXO A | 138 |

Índices de Figuras y Tablas

Figuras:

| | | | |
|--------|------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura | 1-1 | Restaurante del Parque Oceanográfico, Valencia. | 02 |
| Figura | 1-2 | Paseo marítimo Benidorm, Valencia | 03 |
| Figura | 1-3 | Torre de la CCTV, China | 03 |
| Figura | 1-4 | “LKS office building”, Mondragón, España | 04 |
| Figura | 1-5 | “Rocca Tower”, Tallinn, Estonia | 04 |
| Figura | 1-6 | Maison de l’écriture, Montricher, Suiza | 04 |
| Figura | 1-7 | Pasarela peatonal sobre el Barranco de las Ovejas, Alicante | 05 |
| Figura | 1-8 | Villa Navarra, Le Muy, Francia | 05 |
| Figura | 1-9 | Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo, Marsella, Francia | 05 |
| Figura | 1-10 | Mobiliario en HUAD reforzado con fibras | 06 |
| | | | |
| Figura | 2-1 | Tipo de configuraciones del ensayo de pullout | 12 |
| Figura | 2-2 | Detalle de la placa de acero con la posición de las fibras | 15 |
| Figura | 2-3 | Proceso de fabricación de la probeta para el ensayo de pullout | 15 |
| Figura | 2-4 | Configuración y dimensiones de la probeta “Dog-bone” | 15 |
| Figura | 2-5 | Equipo para realizar el ensayo de pullout | 15 |
| Figura | 2-6 | Probeta de ensayo de pullout | 16 |
| Figura | 2-7 | Imágenes MEB | 18 |
| Figura | 2-8 | Probetas de mortero | 19 |
| Figura | 2-9 | Probetas de HAC | 19 |
| Figura | 2-10 | Configuración del ensayo de Pullout para probetas de HAC | 19 |
| Figura | 2-11 | Configuración del ensayo de pullout para probetas de mortero | 19 |
| Figura | 2-12 | Probeta en forma de "Dog-bone" y posición de las fibras | 21 |
| Figura | 2-13 | Equipo para el ensayo de pullout | 22 |
| Figura | 2-14 | Configuraciones de tres tipos de extremo con gancho de las fibras metálicas | 22 |
| Figura | 2-15 | Elaboración de probetas a ser ensayadas por pullout | 22 |
| Figura | 2-16 | Configuración del ensayo de pullout | 22 |
| Figura | 2-17 | Fibras de acero | 23 |
| Figura | 2-18 | Producción de probetas de ensayo | 24 |
| Figura | 2-19 | Configuración del ensayo pullout | 24 |
| Figura | 2-20 | Geometría de las fibras metálicas con gancho | 25 |
| Figura | 2-21 | Configuración del ensayo de pullout | 26 |
| Figura | 2-22 | Dimensiones de la probeta | 27 |
| Figura | 2-23 | Configuración (#1) del ensayo de pullout | 27 |
| Figura | 2-24 | Configuración (#2) del ensayo de carga sostenida | 28 |
| Figura | 2-25 | Esquema de la probeta de ensayo de pullout | 29 |
| Figura | 2-26 | Probetas para el ensayo de pullout | 30 |
| Figura | 2-27 | Esquema de la configuración del ensayo de pullout | 30 |
| | | | |
| Figura | 3-1 | Imágenes MEB del Cemento Pórtland en polvo | 44 |
| Figura | 3-2 | Curva granulométrica de los agregados finos | 46 |
| Figura | 3-3 | Ensayo de presencia de Impurezas orgánicas | 46 |
| Figura | 3-4 | Resultados del ensayo del Cono de Marsh | 47 |
| Figura | 3-5 | Macrofibras de acero WIRAND FF1 | 48 |

| | | | |
|--------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura | 3-6 | Imágenes MEB de las Fibras Control N°1 y N°2 | 49 |
| Figura | 3-7 | Imágenes MEB de la Fibra Control N°3 | 50 |
| Figura | 3-8 | Puntos analizados mediante EDS en las imágenes MEB de las fibras de acero N°1 y N°2 | 51 |
| Figura | 3-9 | Microfibras poliméricas FibroMac® 12 | 52 |
| Figura | 3-10 | Instrumental utilizado para la fabricación de las mezclas | 54 |
| Figura | 3-11 | Ensayo de consistencia de las mezclas de microhormigón | 55 |
| Figura | 3-12 | Probetas prismáticas 40x40x160 mm para ensayo de resistencia a flexión y compresión | 55 |
| Figura | 3-13 | Prensa PILOT modelo 4 - C47C02 para ensayo de flexión y compresión | 56 |
| Figura | 3-14 | Configuración geométrica de las probetas utilizadas para el ensayo de pullout de una fibra aislada | 57 |
| Figura | 3-15 | Posición del conjunto de 16 fibras | 58 |
| Figura | 3-16 | Configuración geométrica de las probetas utilizadas para el ensayo de pullout de un conjunto de 16 fibras | 58 |
| Figura | 3-17 | Adaptación del molde para la configuración de probeta D1 | 59 |
| Figura | 3-18 | Adaptación del molde para la configuración de probeta D2 | 59 |
| Figura | 3-19 | Fibra recta y fibra con gancho | 60 |
| Figura | 3-20 | Fabricación de probeta con fibra aislada (D1) | 60 |
| Figura | 3-21 | Fabricación de probeta con 16 fibras (D2) | 61 |
| Figura | 3-22 | Prensa INSTRON modelo 1011 | 62 |
| Figura | 3-23 | Características del sistema de sujeción de la probeta D1 | 62 |
| Figura | 3-24 | Características del sistema de sujeción de la probeta D2 | 63 |
| Figura | 3-25 | Rectificación del origen del gráfico carga-desplazamiento para resultados del dispositivo D2 | 65 |
| Figura | 3-26 | Etapas de los mecanismos de unión de la interfaz F-M mediante el ensayo de pullout de una fibra de acero aislada | 66 |
| Figura | 3-27 | Parámetros a evaluar (P_1 , P_2 , EP) en la curva carga-desplazamiento para el dispositivo D1 con fibra de acero con extremo recto | 67 |
| Figura | 3-28 | Parámetros a evaluar (P_1 , P_2 , P_G , EP) en la curva carga-desplazamiento para el dispositivo D1 con fibra de acero con extremo con gancho | 67 |
| Figura | 3-29 | Parámetros a evaluar (P_1 , P_G , EP) en la curva carga-desplazamiento para el dispositivo D2 con fibra de acero con extremo recto y con gancho | 68 |
| Figura | 3-30 | Probeta partida en dos mitades para extraer muestra | 69 |
| Figura | 3-31 | Muestra de la matriz en la zona del surco que deja la fibra al ser arrancada | 69 |
| Figura | 3-32 | Muestras de la matriz | 70 |
| Figura | 3-33 | Microscopio Electrónico de Barrido (JEOL JS M 5900LV) equipado con detector de rayos X de energía dispersa (EDS). | 71 |
| Figura | 3-34 | Equipo DESK II DENTON VACUUM que metaliza la superficie de las muestras con oro | 71 |
| Figura | 3-35 | Muestra de cemento en polvo (a), fibras de acero (b) y muestras de matriz (c), antes y después de la metalización con oro | 72 |
| Figura | 3-36 | Zonas del surco a analizar mediante MEB | 72 |
| Figura | 4-1 | Consistencia de las mezclas de microhormigón | 74 |
| Figura | 4-2 | Resultados de resistencia a flexión y compresión (UNIT-ISO 679) de las mezclas de microhormigón | 75 |
| Figura | 4-3 | Curvas carga-desplazamiento de D1 para: (a) MH1/0/R y (b) MH2/0/R | 76 |
| Figura | 4-4 | Curvas carga-desplazamiento de D1 para: (a) MH1/5/R y (b) MH2/5/R | 76 |

| | | | |
|--------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura | 4-5 | Curvas carga-desplazamiento de D1 para: (a) MH1/10/R y (b) MH2/10/R | 77 |
| Figura | 4-6 | Curvas carga-desplazamiento de D1 para: (a) MH1/15/R y (b) MH2/15/R | 77 |
| Figura | 4-7 | Curvas carga-desplazamiento promedio con la configuración del dispositivo D1 con fibra de acero con extremo recto | 78 |
| Figura | 4-8 | Etapas del comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo recto | 78 |
| Figura | 4-9 | Etapas del comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo recto, según el tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibras poliméricas | 79 |
| Figura | 4-10 | Cargas máximas de adherencia química para fibra de acero con extremo recto: (a) primer pico (P_1) para MH1 y MH2; (b) segundo pico (P_2) para MH2 | 79 |
| Figura | 4-11 | Energía de pullout para fibra de acero con extremo recto: (a) hasta 0,5mm ($EP_{(0,5mm)}$); (b) hasta 4mm ($EP_{(4mm)}$) | 80 |
| Figura | 4-12 | Curvas carga-desplazamiento de D1 para (a) MH1/0/G y (b) MH2/0/G | 81 |
| Figura | 4-13 | Curvas carga-desplazamiento de D1 para (a) MH1/5/G y (b) MH2/5/G | 82 |
| Figura | 4-14 | Curvas carga-desplazamiento de D1 para (a) MH1/10/G y (b) MH2/10/G | 82 |
| Figura | 4-15 | Curvas carga-desplazamiento de D1 para (a) MH1/15/G y (b) MH2/15/G | 82 |
| Figura | 4-16 | Curvas carga-desplazamiento promedio con la configuración del dispositivo D1 con fibra de acero con extremo con gancho | 83 |
| Figura | 4-17 | Etapas del comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo con gancho, según el tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibras poliméricas | 84 |
| Figura | 4-18 | Cargas máximas de adherencia química (a) primer pico P_1 y (b) segundo pico P_2 ; y (c) primera carga máxima de anclaje mecánico (P_{G1}) para fibra de acero con extremo con gancho | 85 |
| Figura | 4-19 | Energía de pullout para fibra de acero con extremo con gancho hasta desplazamientos de: (a) 0,5mm; (b) 4mm; (c) 12mm | 85 |
| Figura | 4-20 | Estiramiento diferencial del gancho de las fibras arrancadas de la matriz MH1 y MH2 | 87 |
| Figura | 4-21 | Comparativa del comportamiento de pullout de fibras con extremo recto y con gancho, para el dispositivo 1 | 88 |
| Figura | 4-22 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/0/R | 88 |
| Figura | 4-23 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/0/R | 89 |
| Figura | 4-24 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/5/R | 89 |
| Figura | 4-25 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/5/R | 89 |
| Figura | 4-26 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/10/R | 90 |
| Figura | 4-27 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/10/R | 90 |
| Figura | 4-28 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/15/R | 90 |
| Figura | 4-29 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/15/R | 91 |
| Figura | 4-30 | Curvas carga-desplazamiento promedio con la configuración del dispositivo D2 con fibras de acero con extremos rectos | 92 |
| Figura | 4-31 | Etapas del comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras con extremo recto | 92 |
| Figura | 4-32 | Etapas del comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras de acero con extremo recto, según el tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibras poliméricas | 93 |

| | | | |
|--------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura | 4-33 | Carga máxima de adherencia (P_1) para conjunto de 16 fibras de acero con extremos rectos | 93 |
| Figura | 4-34 | Energía de pullout para conjunto de 16 fibras de acero con extremos rectos hasta desplazamientos de: (a) 0,5mm; (b) 1,5mm; (c) 15mm | 94 |
| Figura | 4-35 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/0/G | 95 |
| Figura | 4-36 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/0/G | 96 |
| Figura | 4-37 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para (a) MH1/5/G y (b) MH2/5/G | 96 |
| Figura | 4-38 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/10/G | 96 |
| Figura | 4-39 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/10/G | 97 |
| Figura | 4-40 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/15/G | 97 |
| Figura | 4-41 | Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/15/G | 97 |
| Figura | 4-42 | Curvas carga-desplazamiento promedio con la configuración del dispositivo D2 con fibras de acero con extremos con gancho | 98 |
| Figura | 4-43 | Etapas del comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras de acero con extremo con gancho, según el tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibra polimérica | 99 |
| Figura | 4-44 | Cargas máximas de adherencia química (P_1) y anclaje mecánico (P_{G1}) para conjunto de 16 fibras de acero con extremos con ganchos | 100 |
| Figura | 4-45 | Energía de pullout para conjunto de 16 fibras de acero con extremos con ganchos hasta desplazamientos de: (a) 0,5mm; (b) 1,5mm; (c) 15mm | 100 |
| Figura | 4-46 | Comparativa del comportamiento de pullout de fibras con extremo recto y con gancho (D2) | 101 |
| Figura | 4-47 | Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH1/0/R | 102 |
| Figura | 4-48 | Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH1/5/R | 103 |
| Figura | 4-49 | Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH1/10/R | 104 |
| Figura | 4-50 | Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH1/15/R | 105 |
| Figura | 4-51 | Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH2/0/R | 106 |
| Figura | 4-52 | Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH2/10/R | 107 |
| Figura | 4-53 | Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH2/10/R | 108 |
| Figura | 4-54 | Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH2/15/R | 109 |
| Figura | 4-55 | Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH1/0/R | 110 |
| Figura | 4-56 | Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH1/0/R | 111 |
| Figura | 4-57 | Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH1/5/R | 112 |
| Figura | 4-58 | Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH1/5/R | 113 |
| Figura | 4-59 | Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH1/10/R | 114 |
| Figura | 4-60 | Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH1/10/R | 115 |
| Figura | 4-61 | Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH1/15/R | 116 |
| Figura | 4-62 | Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH1/15/R | 117 |
| Figura | 4-63 | Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH2/0/R | 118 |
| Figura | 4-64 | Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH2/0/R | 119 |
| Figura | 4-65 | Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH2/10/R | 120 |
| Figura | 4-66 | Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH2/10/R | 121 |
| Figura | 4-67 | Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH2/15/R | 122 |
| Figura | 4-68 | Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH2/15/R | 123 |

| | | | |
|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura | 4-69 | Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH2/15/R | 124 |
| Figura | 4-70 | Imágenes MEB del surco dejado en la matriz por la fibra al ser arrancada | 126 |
| Figura | 4-71 | Imágenes MEB de la superficie de las fibras de acero según tipo de matriz y contenido de MF | 127 |
| Figura | 4-72 | Imágenes MEB de los productos de hidratación del cemento en la matriz MH1 | 128 |
| Figura | 4-73 | Imágenes MEB de los productos de hidratación del cemento en la matriz MH2 | 129 |
| Figura | 4-74 | Imágenes MEB de las microfibras poliméricas en la ZdeT de la interfaz F-M | 130 |
| | | | |
| Figura | A-1 | Imágenes MEB de la fibra - MH1/0/R | 139 |
| Figura | A-2 | Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R | 140 |
| Figura | A-3 | Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R | 141 |
| Figura | A-4 | Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R | 142 |
| Figura | A-5 | Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R | 143 |
| Figura | A-6 | Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R | 144 |
| Figura | A-7 | Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R | 145 |
| Figura | A-8 | Imágenes MEB de la fibra - MH1/5/R | 146 |
| Figura | A-9 | Imágenes MEB de la matriz MH1/5/R | 147 |
| Figura | A-10 | Imágenes MEB de la matriz MH1/5/R | 148 |
| Figura | A-11 | Imágenes MEB de la fibra - MH1/10/R | 149 |
| Figura | A-12 | Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R | 150 |
| Figura | A-13 | Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R | 151 |
| Figura | A-14 | Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R | 152 |
| Figura | A-15 | Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R | 153 |
| Figura | A-16 | Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R | 154 |
| Figura | A-17 | Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R | 155 |
| Figura | A-18 | Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R | 156 |
| Figura | A-19 | Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R | 157 |
| Figura | A-20 | Imágenes MEB de la fibra - MH1/15/R | 158 |
| Figura | A-21 | Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R | 159 |
| Figura | A-22 | Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R | 160 |
| Figura | A-23 | Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R | 161 |
| Figura | A-24 | Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R | 162 |
| Figura | A-25 | Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R | 163 |
| Figura | A-26 | Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R | 164 |
| Figura | A-27 | Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R | 165 |
| Figura | A-28 | Imágenes MEB de la fibra – MH2/0/R | 166 |
| Figura | A-29 | Imágenes MEB de la matriz MH2/0/R | 167 |
| Figura | A-30 | Imágenes MEB de la matriz MH2/0/R | 168 |
| Figura | A-31 | Imágenes MEB de la matriz MH2/0/R | 169 |
| Figura | A-32 | Imágenes MEB de la matriz MH2/0/R | 170 |
| Figura | A-33 | Imágenes MEB de la fibra – MH2/10/R | 171 |
| Figura | A-34 | Imágenes MEB de la fibra – MH2/10/R | 172 |
| Figura | A-35 | Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R | 173 |
| Figura | A-36 | Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R | 174 |
| Figura | A-37 | Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R | 175 |
| Figura | A-38 | Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R | 176 |

| | | | |
|--------|------|-------------------------------------|-----|
| Figura | A-39 | Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R | 177 |
| Figura | A-40 | Imágenes MEB de la fibra – MH2/15/R | 178 |
| Figura | A-41 | Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R | 179 |
| Figura | A-42 | Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R | 180 |
| Figura | A-43 | Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R | 181 |
| Figura | A-44 | Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R | 182 |
| Figura | A-45 | Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R | 183 |
| Figura | A-46 | Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R | 184 |
| Figura | A-47 | Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R | 185 |

Tablas:

| | | | |
|-------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla | 2-1 | Diferentes configuraciones del ensayo de pullout de fibras: en la modalidad de “single-sided test” con una sola fibra | 34 |
| | 2-2 | Diferentes configuraciones del ensayo de pullout de fibras: en la modalidad de “doble-sided test” con múltiples fibras | 36 |
| Tabla | 2-3 | Síntesis de datos sobre el tipo de matriz utilizada | 37 |
| Tabla | 2-4 | Síntesis de datos sobre el tipo y características de las fibras utilizadas | 38 |
| Tabla | 2-5 | Síntesis de datos sobre el tipo de ensayos realizados sobre la matriz y la interfaz F-M | 39 |
| Tabla | 3-1 | Microhormigón empleado en Rodríguez de Sensale et al. (2012) | 42 |
| Tabla | 3-2 | Dosificaciones de microhormigón empleadas en la campaña experimental | 42 |
| Tabla | 3-3 | Resumen de ensayos y métodos empleados para la caracterización de materiales | 43 |
| Tabla | 3-4 | Composición química del CPC40 | 44 |
| Tabla | 3-5 | Propiedades físicas del CPC40 | 45 |
| | 3-6 | Propiedades Mecánicas del CPC40 | 45 |
| Tabla | 3-7 | Densidad, peso específico y absorción de los agregados finos | 45 |
| Tabla | 3-8 | Datos técnicos de macrofibras de acero WIRAND FF1 | 48 |
| Tabla | 3-9 | Resultados del análisis mediante EDS de la fibra de acero N°1 (F1) y Fibra N°2 (F2) | 51 |
| Tabla | 3-10 | Datos técnicos de las microfibras poliméricas FibroMac® 12 | 52 |
| Tabla | 3-11 | Resumen de ensayos y métodos empleados para el análisis de la interfaz F-M, la matriz cementícea y fibras de acero | 53 |
| Tabla | 3-12 | Series de probetas elaboradas para el ensayo de pullout | 64 |

Símbolos y abreviaciones

| | |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| a/agl | Relación agua/aglomerante |
| a/c | Relación agua/cemento |
| ACCV | Alto contenido de ceniza volante |
| CH | Hidróxido de calcio |
| CM | Cuarzo molido |
| CP | Cemento Pórtland |
| CPC | Cemento Pórtland Compuesto |
| CSH | Silicato de calcio hidratado |
| CV | Ceniza volante |
| D | Diámetro de la fibra |
| DTG | Ensayo "derivative thermo-gravimetry" |
| D1 | Configuración de ensayo "single-sided test" con una fibra |
| D1 | Configuración de ensayo "doble-sided test" con un conjunto de 16 fibras |
| EDS | <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> |
| E _p | <i>Energía de Pullout</i> |
| FC | Filler calcáreo |
| F-M | Fibra-matriz |
| FRX | Fluorescencia de Rayos X |
| HAC | Hormigón autocompactante |
| HRF | Hormigón reforzado con fibras |
| HS | Humo de sílice |
| HUAD | Hormigón de ultra-alto desempeño |
| HVFA | High volume fly ash mortar |
| L | Largo de la fibra |
| Li | Longitud inicial |
| Lf | Longitud final |
| L/D | Relación de aspecto de la fibra (largo/diámetro) |
| LVDT | Linear Variable Differential Transformer |
| MD | Micro-Dureza o dureza Vickers |
| MEB | Microscopía electrónica de barrido |
| MF | Microfibra |
| MH | Microhormigón |
| MIP | Ensayo "Mercury Intrusion Porosimetry" |
| MO | Microscopía óptica |
| MS | Micro sílice |
| NC | nano-CaCO ₃ |
| NS | nano sílice |
| PP | Polipropileno |
| P ₁ | primera carga máxima de adherencia química |
| P ₂ | segunda carga máxima de adherencia química |
| P _{G1} | primera carga máxima de anclaje mecánico |

| | |
|-----------------|------------------------------------------|
| P _{G2} | segunda carga máxima de anclaje mecánico |
| TG | Thermo-gravimetry |
| TMA | Tamaño máximo de agregado |
| UAD | Ultra-alto desempeño |
| UHPC | Ultra-high performance concrete |
| ZdeT | Zona de Transición |

Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN

1.1 Significancia del estudio de Hormigones Reforzados con Fibras en obras de Arquitectura.

En el desarrollo de la arquitectura actual, hay una búsqueda de integralidad y complementariedad de las diferentes áreas, en pos de lograr una expresividad formal innovadora, una respuesta tectónica de calidad y una poética de alto valor. Dentro de este marco, los avances tecnológicos al servicio de la arquitectura permiten materializar planteos formales que eran impensables hasta hace algunas décadas atrás.

En este sentido “en los últimos años el hormigón ha adquirido un desarrollo tecnológico considerable, adaptándose a las necesidades que los arquitectos demandan e introduciendo nuevas características en su composición que se traducen en mejores acabados o nuevas prestaciones mecánicas” (García-Gasco Lominchar et al., 2009).

La innovación tecnológica del hormigón reforzado con fibras ofrece en este sentido nuevas oportunidades para el diseño.

El hormigón es el material más usado en la industria de la construcción (Aitcin, 2000; Mehta & Monteiro, 2006). Si bien su principal característica es su excelente resistencia a la compresión, sin embargo, es un material que se considera tiene un comportamiento casi frágil con baja resistencia a la tracción (10% de la resistencia a la compresión). Por lo cual, cuando el hormigón es sometido a fuerzas de tracción se fisura casi inmediatamente. Debido a ello, en el diseño de piezas de hormigón para uso estructural se despreja la capacidad mecánica a tracción del hormigón, y en su lugar se emplean barras de acero dispuestas en cantidad y posición adecuadas para resistir esos esfuerzos (Hormigón Armado).

En las últimas cuatro décadas, el desarrollo de la tecnología del hormigón ha realizado grandes avances, entre los cuales el Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) ha sido uno de ellos. Refiere a aquellos hormigones a los que se incorporan a su masa fibras de corta longitud, discretas (discontinuas) y aleatoriamente distribuidas. Esas fibras pueden ser de acero, poliméricas o combinaciones; y pueden emplearse para uso estructural o no. En aquellos HRF empleados para aplicaciones estructurales, las fibras aumentan la capacidad de carga y ductilidad de las estructuras, y la resistencia residual post-fisuración aportada por el refuerzo de las fibras es considerada en el cálculo estructural y, en algunos casos, permite sustituir parcial (ejemplo de las Figuras 1-1 y 1-2) o totalmente el refuerzo tradicional con barras de acero (ejemplos de las Figuras 1-4 a 1-10), y en algunos casos ello conlleva a mejorar la eficiencia de la producción acortando plazos de ejecución y reduciendo costos globales de obra.

Por otra parte, el uso de fibras brinda una solución efectiva para el control de fisuración del hormigón, lo cual conlleva a una mejora significativa en la calidad y durabilidad, aumentando su vida útil, lo cual redundará en definitiva en la mejora del ciclo de vida y sostenibilidad del hormigón en las obras de Arquitectura. Un ejemplo de ello es el Restaurante del Parque Oceanográfico de Valencia (Figura 1-1), cuyo diseño se basa en la estructura del restaurante “Los Manantiales” del Arq. Félix Candela (Xochimilco, México), construido el año 1957. La estructura de Félix Candela, desde el momento de su inauguración, presentó el problema de que el hormigón estaba fisurado

y ello trajo como consecuencias problemas de durabilidad. En ambos casos se tiene una estructura laminar delgada formada por la intersección de 4 paraboloides hiperbólicos sostenidos por costillas radiales. La solución del Restaurante del Parque Oceanográfico es una estructura laminar de 6 cm de espesor que, si bien también lleva una malla de refuerzo central y nervios radiales también reforzados con varillas de acero, se utilizó HRF con fibras de acero como complemento del refuerzo estructural y sobre todo para el control de la fisuración logrando una estructura mucho más durable.

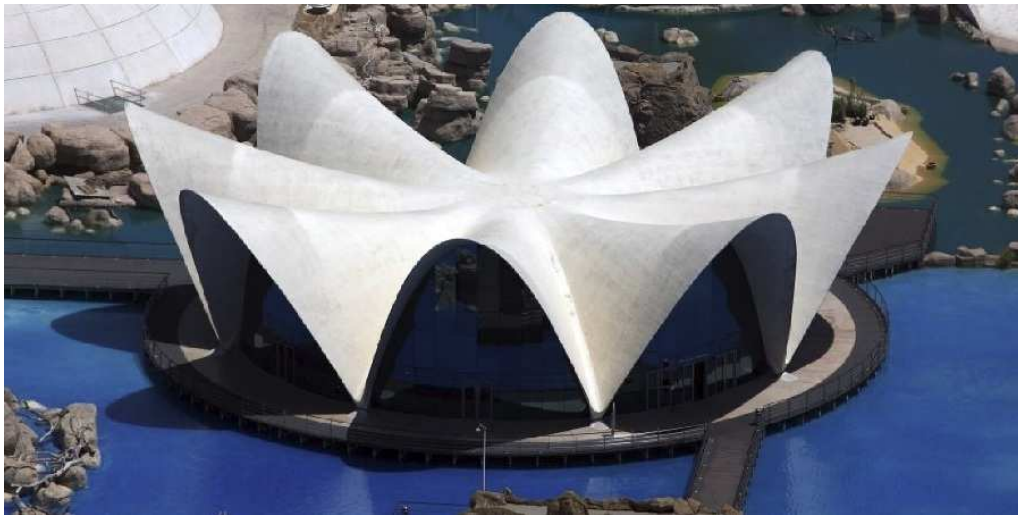


Figura 1-1. Restaurante del Parque Oceanográfico, Valencia.

Otro ejemplo interesante de analizar es el del Paseo Marítimo Benidorm ubicado en Valencia (Figura 1-2), proyectado por los Arqs. Carlos Ferrater y Xavier Martí Galí, que consiste en un muro de 4-5 m de altura y de 1300 m de largo. Está conformado por una superficie con doble curvatura, que al no ser una superficie reglada el armado de la parrilla de refuerzo de barras de acero era muy compleja. El muro no tiene empujes horizontales y estaba apoyado en contrafuertes, por lo cual sólo tenía que soportar su peso propio y consecuentemente las tensiones presentes en el elemento eran bajas y el uso del HRF era adecuado. El muro estaba previsto construirse de 12 cm de espesor con armadura central y al analizar el modelo tensional se vio que fisuraba, por lo cual inicialmente se propuso que las fibras fueran el único refuerzo estructural. Pero no se llegó a tiempo con la solución estructural a la inauguración de los primeros 20 m previstos. Finalmente se construyó la solución del muro de 12 cm de espesor con armadura central galvanizada y en el hormigón se usaron microfibras sintéticas. Aparecieron fisuras como estaba previsto, pero cabe observar que, si se hubiera utilizado HRF reforzado con fibra de acero, se habría obtenido una solución estructural con un muro de menor espesor y con fisuras de menor entidad. Por otra parte, al ubicarse en un ambiente marítimo los requerimientos de durabilidad eran mayores, y el control de las fisuras era un aspecto de suma importancia.

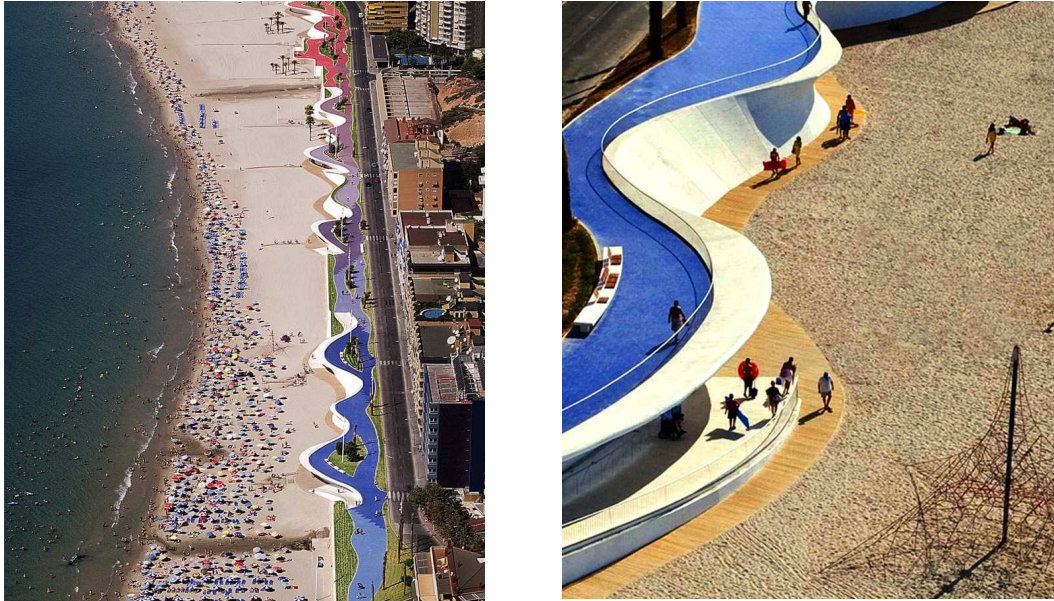


Figura 1-2. Paseo marítimo Benidorm, Valencia.

Por lo cual, en este tipo de superficies donde las tensiones se encuentran distribuidas, el uso del HRF con fibras metálicas es una buena solución con las fibras como único refuerzo estructural. Si bien ya hace cuatro décadas que se viene estudiando el HRF, el uso estructural del mismo es más reciente y aún tiene un camino por recorrer antes de que su aplicación se produzca en forma más extendida.

La torre de oficinas centrales de China Central Television (CCTV), diseñada los Arqs. Rem Koolhaas y Ole Scheeren y el diseño estructural a cargo de Ove Arup, se ha convertido en uno de los iconos de referencia de Pekín (Figura 1-3). El diseño estructural implicó grandes desafíos (Carroll et al., 2006), no sólo por su forma tan particular con una altura de 234m, sino que además se encuentra en una zona sísmica activa. Si bien la estructura principal es de acero, las columnas externas son de hormigón debido a la magnitud de las cargas que por ellas transitan. Para su construcción se utilizó un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero combinado con el tradicional refuerzo con barras de acero, lo cual permitió alcanzar una resistencia a la tracción adecuada a los requerimientos, además de minimizar fisuras.



Figura 1-3. Torre de la CCTV, China.

En este sentido, actualmente existen más de cuarenta edificios construidos con esta nueva tecnología del HRF empelado en losas elevadas, cuyo único refuerzo estructural son las fibras metálicas eliminándose por completo las barras de acero de refuerzo tradicional (Destrée & Mandl, 2008). Algunos de estos ejemplos son el “LKS office building” en la ciudad de Mondragón en España (Figura 1-4) y el “Rocca Tower” en la ciudad de Tallinn Estonia (Figura 1-5).



Figura 1-4. “LKS office building”, Mondragón, España.



Figura 1-5. “Rocca Tower”, Tallinn, Estonia.

La Maison de l’écriture (Figura 1-6) en Montricher- Suiza (2009-2013) fue diseñada por el arquitecto Vincent Mangeat como residencia temporaria para escritores. El diseño estructural estuvo a cargo de Muttoni & Fernández Consultores. Es una estructura compleja que combina refuerzo tradicional, postensado y fibras de acero. La cubierta al aire libre fue realizada con hormigón blanco y fibras de acero, donde las fibras jugaron un papel muy importante.



Figura 1-6. Maison de l’écriture, Montricher, Suiza.

Más recientemente se ha desarrollado el hormigón de ultra alto desempeño (HUAD, o su sigla en inglés UHPC) reforzado con fibras el cual permite construir estructuras de hormigón sin usar ningún tipo de refuerzo con barras de acero, y además ser un material de alta durabilidad. Existen varios ejemplos construidos con este nuevo material, como es el caso de la pasarela peatonal sobre el Barranco de las Ovejas en Alicante (2014) que tiene un ancho 3m y una

longitud 44m (Figura 1-7), que al estar ubicada en un ambiente marino además tenía requerimientos altos de durabilidad (Serna et al., 2015).



Figura 1-7. Pasarela peatonal sobre el Barranco de las Ovejas, Alicante.

Otro ejemplo es la Villa Navarra ubicada en Le Muy en Francia (Figura 1-8), diseñada por el Arq. Rudy Ricciotti, cuenta con una cubierta de 40 m de longitud y 9 m de ancho, con casi 8 m en voladizo, construida con elementos prefabricados de hormigón de ultra alto desempeño reforzado con fibras que permite lograr secciones considerablemente más delgadas y luces mayores sin emplear barras de refuerzo de acero.

En la Figura 1-9 puede observarse el Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo ubicado en la ciudad de Marsella en Francia, también diseñado por el Arq. Rudy Ricciotti, que presenta una celosía de hormigón de ultra alto desempeño reforzado exclusivamente con fibras de acero.



Figura 1-8. Villa Navarra, Le Muy, Francia



Figura 1-9. Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo, Marsella, Francia

Incluso con este tipo de hormigón HUAD se ha realizado mobiliario con espesores entre 16 y 38 mm sin utilizar ningún tipo de refuerzo convencional (Figura 1-9), desarrollado en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón de la Universidad Politécnica de Valencia.



Figura 1-10. Mobiliario en HUAD reforzado con fibras

El estudio del HRF está en pleno desarrollo y su uso viene conquistando nuevos campos de aplicación en Arquitectura. El uso de fibras estructurales permite el reemplazo parcial o total de las tradicionales barras de acero de refuerzo, lo cual representa una solución competitiva tanto desde el punto de vista económico como técnico. Además, representa una mejora sustancial de la calidad y durabilidad de las estructuras de hormigón en obras de Arquitectura. Por este motivo resulta fundamental profundizar en el conocimiento de las capacidades de este material, que habilita nuevos horizontes aún por desarrollar.

Como fue mencionado, las fibras distribuidas aleatoriamente en la matriz del hormigón permiten un mejor control de la fisuración, y en algunos casos limitan el crecimiento de las fisuras, lo cual hace que se logre un patrón de fisuración múltiple y distribuido, en vez de la aparición de una única fisura con mayor apertura. Este comportamiento está condicionado fuertemente por la calidad de la unión que se da entre la fibra y la matriz (denominada como “interfaz F-M”) (Deng et al., 2018).

En este sentido, (Wu, Khayat, et al., 2018) indican que cuando un material compuesto se somete a determinadas cargas externas, la matriz es quien inicialmente opone resistencia hasta alcanzar un determinado punto (carga-pico), superada esta instancia la carga es transferida a las fibras a través de la interfaz F-M. Los autores señalan que el mecanismo de unión entre la fibra y la matriz circundante involucra tres instancias: (1) de adhesión o enlace químico; (2) de fricción; y (3) de anclaje mecánico de la fibra. Justamente esta primera instancia de “enlace químico” está vinculada con las propiedades de la interfaz F-M. Una vez que la “adhesión o enlace químico” entre la fibra y la matriz es superada por la tensión que provoca la carga externa, se produce la desunión de la fibra, y allí entran en juego las siguientes instancias “de fricción” y/o “anclaje mecánico de la fibra” con la matriz, lo cual está gobernado principalmente por la geometría y tratamiento superficial de la fibra.

En consecuencia, lograr una unión de interfaz F-M fuerte, repercute en un aumento de la resistencia residual post-fisuración y ductilidad del compuesto cementicio, mejorando el desempeño general y fundamentalmente el comportamiento mecánico del material compuesto (HRF) para uso estructural.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo General:

El objetivo es analizar los mecanismos de unión de la interfaz fibra-matriz (F-M) en compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras metálicas de manera de identificar los parámetros y propiedades que gobiernan la unión entre ambos materiales.

Objetivos Específicos:

- Estudiar los mecanismos de unión de la interfaz F-M a nivel macroestructural mediante ensayo de pullout de fibras de acero en matrices cementicias.
- Analizar el comportamiento de las fibras de acero en las matrices cementicias en función de la geometría de la fibra.
- Estudiar cómo influyen en la interfaz F-M, la composición y la resistencia de la matriz, y la incorporación de microfibras poliméricas en la matriz.
- Analizar la interfaz F-M a nivel microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) como técnica de observación directa de la interfaz F-M.
- Correlacionar los resultados obtenidos a nivel macro y microestructural.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS DE MAESTRÍA

A los efectos de alcanzar los objetivos planteados, la Tesis de Maestría se estructura en cinco capítulos, el primero de ellos abarca el contexto de estudio y la relevancia del tema en obras de Arquitectura, los objetivos y el alcance de la investigación.

En el segundo capítulo se realiza el Estado del Arte del tema en dos etapas. Primeramente y en forma general, el estado del conocimiento en relación con los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF) y, en una segunda etapa, se aborda más en detalle el estado del conocimiento relativo a los mecanismos de unión de la interfaz fibra-matriz (F-M).

A continuación, en el tercer capítulo se realiza el planeamiento de la investigación, donde se establece la metodología a seguir. Posteriormente, en el cuarto capítulo se plantean los resultados obtenidos de la campaña experimental junto con el análisis y discusión. En el quinto capítulo se plantean las conclusiones y recomendaciones para futuras líneas de investigación. Por último, se indican las referencias bibliográficas analizadas y se presenta un anexo con fichas de las MEB realizadas.

1.4 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

En cuanto a la **matriz cementicia se utilizó microhormigón** (elaborado sin agregado grueso), en dos composiciones diferentes con distintas relaciones agua/aglomerante para obtener microhormigones de resistencia normal y de alto desempeño. En relación con las fibras, se

realizó un relevamiento de los diferentes tipos de fibras que se comercializan en el medio y se seleccionaron las fibras a estudiar. Se caracterizaron todos los materiales empleados.

Además, se evaluó el efecto de la incorporación en la matriz de distintos contenidos de microfibras poliméricas. Se evaluó el desempeño mecánico de la matriz a los 28 días de edad a través de ensayos a flexión y compresión. En cuanto a las **microfibras**, se utilizaron microfibras poliméricas.

Se evaluó, a **escala macroestructural**, el comportamiento de las diferentes composiciones de microhormigón seleccionadas y de ambos tipos de fibras metálicas mediante el ensayo de pullout. En la literatura internacional, se utilizan diferentes configuraciones del ensayo de pullout de fibras, pero ninguna está normalizada. A nivel nacional, dicho ensayo no se realiza a la fecha, por lo cual primero se tuvo que implementar y poner a punto la metodología del ensayo de pullout de fibras embebidas en una matriz cementicia. En base a la cantidad de fibras embebidas a ensayar (una fibra aislada y un conjunto de fibras) y al método de aplicación de la fuerza de tracción sobre la probeta (arrancamiento desde un solo lado y desde ambos lados de la probeta), se estudiaron dos configuraciones diferentes del ensayo de pullout de fibras. En base a lo cual, se analizó la influencia de la geometría de la fibra, así como la composición y resistencia de la matriz en el comportamiento de la unión fibra-matriz.

Por otra parte, se extrajeron muestras de las fibras ensayadas por pullout que se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), con ello se evaluó la interfaz F-M a **nivel microestructural**.

Capítulo 2 - ESTADO DEL ARTE

El objetivo del presente capítulo es realizar, primeramente, una revisión del estado del conocimiento del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) en forma general; luego en una segunda instancia, identificar las técnicas de caracterización de la interfaz fibra-matriz y realizar una síntesis de los principales parámetros involucrados y, por último, identificar las normativas y recomendaciones existentes a nivel internacional.

2.1 Estado del arte de los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF).

El **American Concrete Institute** (ACI Committee 544, 1996) define al Hormigón Reforzado con Fibras como *“un hormigón realizado con cementos hidráulicos, que contiene agregados finos o agregados finos y gruesos y fibras discretas (discontinuas).”* Indica que las fibras adecuadas para el refuerzo de hormigón pueden ser de acero, vidrio y polímeros orgánicos (fibras sintéticas).

Por otra parte, la **Instrucción española de Hormigón Estructural** (EHE-08) (Ministerio de Fomento, 2011), en su Anejo 14, establece que *“Los hormigones reforzados con fibras, se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa”*.

Asimismo, el **fib Model Code** (International Federation for Structural Concrete (fib), 2010) establece que el *“Hormigón Reforzado con Fibras es un material compuesto caracterizado por una matriz cementicia y fibras discretas (discontinuas). La matriz está hecha o bien con hormigón o con mortero. Las fibras pueden estar hechas de acero, polímeros, carbono, vidrio o materiales naturales.”*

Las tres definiciones relativas al HRF coinciden en que se trata de un material compuesto conformado por una matriz cementicia y fibras discretas (discontinuas), además, la EHE-08 agrega que las fibras deben estar aleatoriamente distribuidas.

En cuanto a las **fibras** propiamente, en el Anejo 14 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2011), las define como *“elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas”*. Se las puede clasificar en fibras estructurales (se considera su contribución en el cálculo) o no estructurales (mejoran el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto); o también según el material con que están elaboradas: de acero, poliméricas, u otras fibras inorgánicas como las de vidrio. En un mismo hormigón, se puede utilizar combinaciones de distintos tipos de fibras, a este tipo de hormigones se los identifica habitualmente como HRF híbridos.

En particular, las **fibras de acero** se rigen por la norma UNE-EN 14889-1:2008. En el mencionado Anejo 14, indica que este tipo de fibras se pueden clasificar según su proceso de fabricación: trefiladas, cortadas en láminas, extraídas por rascado en caliente (virutas de acero), u otras (por ejemplo, fibras de acero fundidas). Presentan variadas formas: rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc. (Ministerio de Fomento, 2011)

Por otro lado, las **fibras plásticas** están formadas por un material polimérico extrusionado y posteriormente cortado. Se rigen por la norma norma UNE-EN 14889-2:2008. También se las puede clasificar según el proceso de fabricación: monofilamentos extruidos y láminas fibriladas.

Además, según sean sus dimensiones se las clasifica en Microfibras (diámetro < 0,30 mm) o macrofibras (diámetro > 0,30 mm) (Ministerio de Fomento, 2011).

Las principales ventajas del uso del HRF a nivel estructural radican en el control de propagación de fisuras, aumento de la capacidad de carga después de la formación de la primera fisura (resistencia residual post-fisuración), mayor ductilidad y tenacidad. En aquellos HRF empleados para aplicaciones estructurales, la resistencia residual post-fisuración aportada por el refuerzo de las fibras es considerada en el cálculo estructural y, en algunos casos, permite sustituir parcial o totalmente el refuerzo tradicional con barras de acero. Lo cual representa una solución competitiva tanto desde el punto de vista económico como técnico. Además, representa una mejora sustancial de la calidad y durabilidad de las estructuras de hormigón.

El desarrollo de los HRF ha tenido un impulso importante en las últimas décadas, y ello ha permitido avanzar en la definición directrices, reportes técnicos y normas con respecto a los métodos de ensayo y diseño utilizando fibras de acero o junto con fibras sintéticas (H. Singh, 2017). Es el caso de la publicación del *fib* Model Code 2010 (International Federation for Structural Concrete (fib), 2010) donde se establecen las bases para el diseño de elementos estructurales en HRF. En el mismo Código se establece como método ensayo, para evaluar la resistencia a tracción por flexión del HRF, el descrito por la norma UNE-EN 14651. Todo ello sienta las bases teóricas y facilita la aplicación del HRF en el diseño y construcción de diferentes obras civiles y de arquitectura.

Como fue mencionado, las fibras distribuidas aleatoriamente en la matriz del hormigón permiten un mejor control de la fisuración, limitando el crecimiento de las fisuras, lo cual hace que se logre un patrón de fisuración múltiple y distribuido, en vez de la aparición de una única fisura con mayor apertura. En este sentido, Singh (2017) indica que la resistencia de pullout de la unión F-M, las propiedades mecánicas de las fibras y de la matriz cementicia desempeñan un papel sustancial en el control de la fisuración de los elementos de HRF. La resistencia de extracción (pullout) de las fibras en el hormigón y de las propiedades mecánicas de las fibras se vuelven parámetros fundamentales. Asimismo, (Deng et al., 2018) también afirman que este mecanismo está condicionado fuertemente por la calidad de la unión que se da entre la fibra y la matriz (interfaz F-M).

En la misma dirección, (Wu, Khayat, et al., 2018) indican que cuando un material compuesto se somete a determinadas cargas externas, la matriz es quien inicialmente opone resistencia hasta alcanzar un determinado punto (carga-pico), superada esta instancia la carga es transferida a las fibras a través de la interfaz F-M. Los autores señalan que el mecanismo de unión entre la fibra y la matriz circundante involucra tres instancias: (1) de adhesión o enlace químico; (2) de fricción; y (3) de anclaje mecánico de la fibra. Justamente esta primera instancia de “enlace químico” está vinculada con las propiedades de la interfaz F-M. Una vez que la “adhesión o enlace químico” entre la fibra y la matriz es superada por la tensión que provoca la carga externa, se produce la desunión de la fibra, y allí entran en juego las siguientes instancias “de fricción” y/o “anclaje mecánico de la fibra” con la matriz, lo cual está gobernado principalmente por la geometría y tratamiento superficial de la fibra.

En consecuencia, el papel que juega la interfaz fibra-matriz es fundamental en este material compuesto, y lograr una unión de interfaz F-M fuerte repercute en un aumento de la resistencia residual post-fisuración y ductilidad del compuesto cementicio, mejorando el desempeño general y fundamentalmente el comportamiento mecánico del material compuesto (HRF) para uso estructural.

2.2 Estado del arte de las técnicas de caracterización de la interfaz fibra-matriz en compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras.

En esta sección, se analizaron los parámetros que inciden en el comportamiento de la interfaz F-M, y cuáles son las técnicas o ensayos que se pueden utilizar para su evaluación.

En base a la revisión bibliográfica realizada, diferentes autores (Lee et al., 2010; Wu et al., 2016; Deng et al., 2018) concuerdan que el ensayo de arrancamiento (pullout) de fibras de una matriz cementicia, es una técnica adecuada para caracterizar (a nivel macroestructural) el comportamiento de la interfaz F-M, en virtud de mejorar el desempeño mecánico de un HRF. Se ha analizado la influencia de varios factores, como ser:

- la composición y resistencia de la matriz (Abu-Lebdeh et al., 2011)(Shaikh et al., 2016)(Simões et al., 2017) (Abdallah et al., 2017)
- la longitud de la fibra “embebida” en la matriz (Zile & Zile, 2013; Alberti et al., 2016; Deng et al., 2018)
- la forma de la fibra (recta, ondulada, con ganchos, etc)
- el ángulo de inclinación de la fibra (Lee et al., 2010; Alberti et al., 2016)
- el comportamiento frente temperaturas elevadas (Abdallah et al., 2017)
- las condiciones de curado (S. Singh et al., 2004),
- la velocidad de carga (Abu-Lebdeh et al., 2011) (Nieuwoudt & Boshoff, 2017)
- el uso de microfibras incorporadas en la matriz (Deng et al., 2018)

(Wu et al., 2016) afirman que la resistencia y ductilidad de un HUAD dependen principalmente de la calidad de la estructura a micro y nano-escala, especialmente en la interfaz F-M. Por lo tanto, considera que es muy importante diseñar la microestructura de la interfaz F-M, para fortalecer el enlace entre ambos, y mejorar así las macro-propiedades del HRF. En el trabajo indican que hay tres formas principales de mejorar la unión en la interfaz F-M, que son a través de:

- la densificación de la microestructura y aumento de la resistencia de la matriz cementicia mediante:
 - reducción de la relación agua/aglomerante;
 - uso de materiales suplementarios del cemento: humo de sílice (Wu et al., 2016; Wu, Khayat, et al., 2018; Wu, Shi, et al., 2018), ceniza volante (Abdallah et al., 2017; Shaikh et al., 2016), escoria;
 - uso de filler calcáreo (Lee et al., 2010) (Alberti et al., 2016);
 - uso nanopartículas (nano-CaCO₃, nano-SiO₂, nano-TiO₂, y nano-Al₂O₃ (Shaikh et al., 2016) (Wu, Shi, et al., 2018);
 - curado a alta temperatura.
- la mejora del anclaje mecánico mediante el uso de fibras deformadas, donde el efecto de la forma de la fibra es un factor determinante, y en este sentido otros autores también realizan la misma afirmación (Soulioti et al., 2013) (Zile & Zile, 2013)
- realización de tratamientos sobre la superficie de las fibras:
 - tratamiento con plasma de la superficie de fibras de polietileno mejora de la fricción de la interfaz F-M (Li et al., 2005);
 - tratamiento químico con fosfato de zinc de la superficie de fibras metálicas (Soulioti et al., 2013), donde concluye que el efecto más importante en la interfaz F-M se evidencia especialmente cuando la trabazón mecánica no existe (fibras rectas);

- uso de un aditivo químico como mejorador de enlaces de la interfaz F-M entre las fibras de poliolefina y hormigón auto-compactante (Enfedaque et al., 2017).

Por otra parte, (Deng et al., 2018) estudian la inclusión de fibras híbridas (acero y polipropileno) dentro de la matriz de hormigón, concluyendo que tiene efectos positivos en mejorar el comportamiento de pullout de las fibras de acero. En particular, el uso de microfibras de polipropileno tiene un mejor desempeño que las fibras de acero (incorporadas en la matriz), incrementando la carga máxima de pullout (el doble en el caso de fibras rectas; de un 30% en el caso fibras con gancho), la carga residual y la energía de disipación. Las microfibras de polipropileno tienen un diámetro de 0,03 mm y largo de 15 mm (resistencia a tracción de 400 MPa y módulo de elasticidad de 4 GPa) y los contenidos empleados en volumen fueron de 0,05%, 0,10% y 0,15%. La presencia de microfibras dentro de la matriz, permiten que exista un mejor control de la fisuración de la matriz alrededor de la fibra, y ello se traduce en un aumento de las capacidades mecánicas de esa unión F-M.

Si bien el ensayo de pullout de fibras no está normalizado, en la literatura científica se puede observar que hay diferentes configuraciones y variantes que se han ido utilizado a lo largo del tiempo. En el trabajo de (Gray, 1983), ya plantea una clasificación de los tipos de ensayos de pullout de fibra, la cual es retomada y actualizada por (Abbas & Iqbal Khan, 2016). Dicha clasificación se basa en:

- número de fibras embebidas a ensayar:
 - “una fibra”: una sola fibra está sujeta a la fuerza de extracción
 - “múltiples fibras”: dos o más fibras están sujetas a la fuerza de extracción
- al método de aplicación de la fuerza de tracción sobre la probeta:
 - “single-sided test” (ensayo de un solo lado): la desunión y la extracción de la fibra ocurre de un solo lado de la probeta
 - “doble-sided test” (ensayo desde ambos lados): la desunión y la extracción de la fibra puede ocurrir en uno o en ambos lados de la probeta

Las diferentes combinaciones del número de fibras embebidas y al método de aplicación de la fuerza de tracción en las probetas, están representadas en la Figura 2-1 (Abbas & Iqbal Khan, 2016).

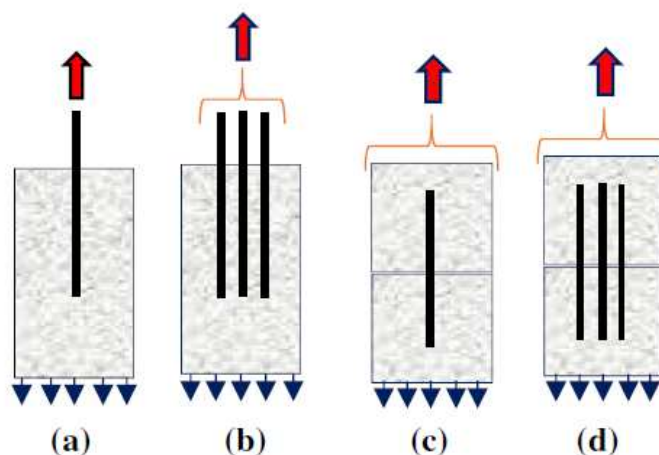


Figura 2-1. Tipo de configuraciones del ensayo de pullout: (a) una fibra -“single-sided test”; (b) múltiples fibras -“single-sided test”; (c) una sola fibra -“doble-sided test”; (d) múltiples fibras -“doble-sided test”. (Abbas & Iqbal Khan, 2016)

En la literatura existen opiniones encontradas en cuanto a las ventajas y desventajas para una u otra configuración de ensayo. Si bien hay concordancia en que el “single-sided test” es el más fácil de implementar y el más comúnmente usado en las investigaciones (Lee et al., 2010; Wu et al., 2016; Deng et al., 2018),

Como desventajas (Lee et al., 2010) señalan que esta configuración requiere de un equipo capaz de medir con mucha precisión debido a que la fuerza de pullout es pequeña. Por otra parte, (Wu et al., 2016) indican que este ensayo tiene la dificultad de sujetar el extremo libre de la fibra. Además, ambos señalan que normalmente hay una gran variación en los resultados experimentales obtenidos y, por lo tanto, se requiere una gran cantidad de muestras para asegurar la confiabilidad de los resultados. Por otra parte, (Wu et al., 2016) observa que la fibra no está embebida completamente como sucede en la realidad.

En cuanto al “doble-sided test”, se usa habitualmente la configuración de probeta con forma de “dog-bone” (adaptación de la norma AASHTO T132) pero la probeta está dividida en dos mitades, las cuales están vinculadas entre sí a través de las fibras. Tiene la complicación del proceso de fabricación de la probeta ya que tiene que hacerse en dos etapas (Wu et al., 2016). Este tipo de configuración es muy usada para el ensayo de pullout de microfibras de diámetro igual o inferior a 0,3 mm (y largo menor a los 15 mm), ya que por tratarse de fibras muy cortas hace inviable el ensayo “single-sided test”. Este tipo de ensayo, con probeta con forma de “dog-bone”, es el habitualmente usado para el ensayo de pullout de microfibras usadas en HUAD, como es el caso de (Lee et al., 2010; Wu et al., 2016; Wu, Khayat, et al., 2018; Wu, Shi, et al., 2018). En cambio, para macrofibras con diámetros mayores a 0,3 mm (longitudes entre 30-60 mm) se utiliza otros tipos de configuraciones.

Asimismo, en base a la revisión bibliográfica realizada, más recientemente (Alberti et al., 2016; Wu et al., 2016; Shaikh et al., 2016; Abdallah et al., 2017; Wu, Shi, et al., 2018; Wu, Khayat, et al., 2018) se han ido incorporando técnicas avanzadas de caracterización de materiales a nivel de la microestructura de la matriz y/o la interfaz F-M, que les permite observar cambios en sus propiedades. Algunas de esas técnicas son:

- “Mercury Intrusion Porosimetry” (MIP): para evaluar la porosidad de la matriz midiendo la estructura de poros
- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB): permite analizar en detalle la interfaz F-M en cuanto a la continuidad entre el silicato de calcio hidratado (CSH) y la fibra, depresiones en la matriz y la superficie de la fibra luego del ensayo de pullout, el mecanismo de refuerzo de la matriz con microfibra.
- Termo-Gravimetría (TG) – permite determinar la cantidad de productos de hidratación, el contenido de hidróxido de calcio (CH)
- Micro-Dureza o dureza Vickers (MD) realizada por micro-indentación
- Microscopía Óptica (MO)

Existen muchas investigaciones a nivel macroestructural del comportamiento de la interfaz F-M de los HRF, pero una pocas de ellas están relacionadas con lo que sucede a nivel microestructural.

En la Tesis de Maestría se analizó el comportamiento de la interfaz F-M tanto a nivel macroestructural (mediante la evaluación del comportamiento de pullout) como a nivel microestructural (mediante MEB).

En función del planteo previo, se realizó una selección de algunos artículos que se presentan a continuación, haciendo hincapié en identificar los siguientes aspectos:

- breve descripción del objetivo del trabajo

- características de las fibras y matrices cementicias empleadas
- diferentes ensayos o técnicas aplicadas sobre la matriz y la interfaz F-M (a nivel macro y microestructural)
- en particular, en relación al ensayo de pullout de una o varias fibras, se identificaron diferentes configuraciones del mismo, así como las características de las probetas a fabricar y los requerimientos del equipamiento que se utiliza
- breve resumen de los principales resultados alcanzados

En base a la revisión de artículos científicos recientes:

- se identificaron las configuraciones del ensayo de pullout desarrolladas, sintetizadas en las Tablas 2-1 y 2-2.
- se elaboraron las Tablas 2-3, 2-4 y 2-5 donde se identifica y recopila información sobre el tipo de matriz empleada (características de materiales y dosificaciones), tipo y características de las fibras utilizadas, y la identificación de ensayos llevados a cabo (sobre la matriz y la interfaz F-M), respectivamente.

El contenido de estas cinco tablas se desarrolla en el punto 2.3, y constituye una herramienta que permitió evaluar y definir la metodología seguida en la campaña experimental.

| | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix |
| Autores | Y. Lee, S.T. Kang, J.K. Kim |
| Revista | Construction and Building Materials 24 (2010) 2030–2041 |

En este trabajo (Lee et al., 2010) se estudia, una manera de caracterizar las propiedades de tracción de una matriz cementicia de ultra-alta resistencia reforzada con fibra de acero, que es a través de la realización de pruebas de pullout de fibra de acero. A través de este ensayo se evaluó el efecto del ángulo de inclinación de la fibra respecto a la dirección de carga (0°, 15°, 30°, 45° y 60°) y, además, se realizó un modelo analítico de pullout considerando este efecto.

- (A) **Características de las fibras:** Se utilizan fibras de acero rectas con un diámetro de 0,2 mm y largo de 13 mm. Se utilizan 32 fibras de acero embebidas en cada probeta con un ángulo de inclinación respecto a la dirección de pullout de 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°. Las características de las fibras se detallan en la Tabla 2-4.
- (B) **Características de la matriz (cementicia de ultra alta resistencia):** Las proporciones de los materiales empleados en la dosificación de la matriz UAD se describe a continuación: 1 parte de cemento, 0.25 partes de agua, 0.25 partes de humo de sílice, 1.10 partes de agregado fino, 0.30 partes de filler, 0.018 parte de superplastificante. Ver Tabla 2-1.
- (C) **Ensayos realizados en el trabajo:**
- Ensayo de resistencia a compresión
 - Ensayo de pullout
- (D) **Configuración del ensayo de pullout: “doble-sided test”**

Las probetas de ensayo de pullout se fabricaron con forma de “dog-bone”, en la Figura 2-4 se ilustra la configuración y las dimensiones de las probetas, en el ensayo se utilizaron múltiples fibras con un determinado posicionamiento (Figura 2-2). En la Figura 2-3 se observa el proceso de fabricación.

Los ensayos se realizaron utilizando una máquina de prueba universal con una capacidad de 10 kN, con control de desplazamiento. El deslizamiento se midió por medio de un clip

colocado en el centro de la muestra (Figura 2-5). Se obtuvieron curvas de carga de pullout vs. deslizamiento.

(E) **RESULTADOS del artículo:** Se observó que la mayor carga máxima de pullout se obtuvo en un ángulo de 30° o 45°, y el deslizamiento máximo aumentó a medida que las fibras se orientaron en un ángulo más inclinado. En base a los resultados experimentales, se propuso un modelo analítico de comportamiento de pullout que considera la inclinación de la fibra.

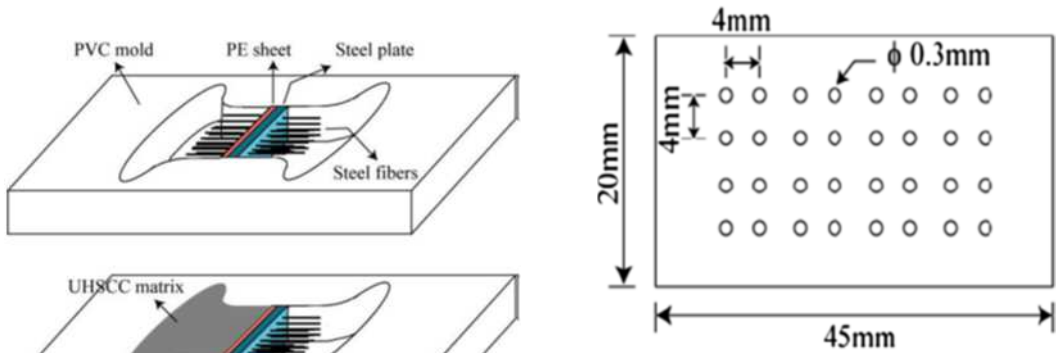


Figura 2-2. Detalle de la placa de acero con la posición de las fibras. (Lee et al., 2010)

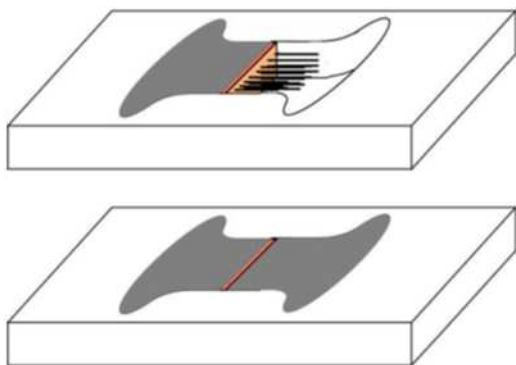


Figura 2-3. Proceso de fabricación de la probeta para el ensayo de pullout. (Lee et al., 2010)

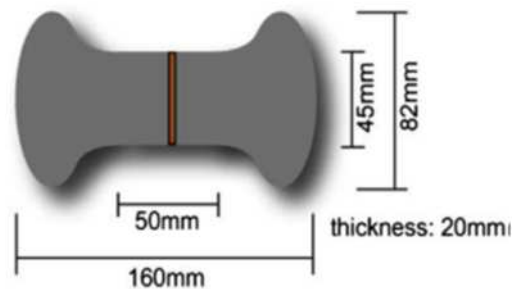


Figura 2-4. Configuración y dimensiones de la probeta "Dog-bone". (Lee et al., 2010)

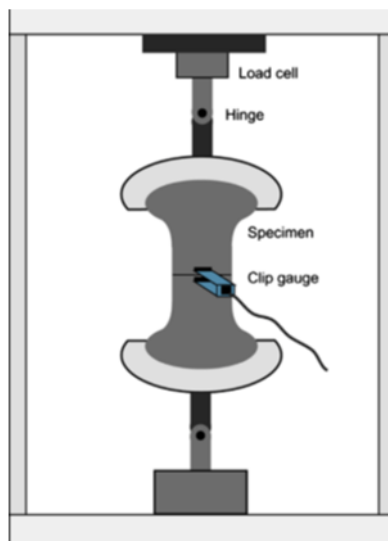


Figura 2-5. Equipo para realizar el ensayo de pullout. (Lee et al., 2010)

| | |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers |
| Autores | E. Zile, O. Zile |
| Revista | Cement and Concrete Research 44 (2013) 18–24 |

El trabajo (Zile & Zile, 2013) propone un modelo teórico simple para predecir la influencia de la geometría de la fibra de acero (deformadas mecánicamente) en su extracción de una matriz cementicia. Durante la extracción, la fibra se somete a procesos reiterados de curvado y retiro de esfuerzos que provocan un aumento de la tensión en la fibra. Este aumento de la tensión depende de la cantidad de trabajo plástico necesario para enderezar la fibra durante la extracción. Los parámetros de entrada del modelo teórico son las propiedades mecánicas y geométricas de fibras de mecánicamente. Se comparan los resultados experimentales del ensayo de pullout (de las fibras con gancho y onduladas) con las predicciones del modelo, se observa una buena correlación.

- (A) **Características de las fibras:** Se utilizaron fibras de acero comerciales (ArcelorMittal) de diferente forma (rectas, con ganchos y onduladas). Las especificaciones de cada una de ellas están indicadas en la Tabla 2-4.
- (B) **Características de la matriz de cementicia (hormigón):** Se utiliza un hormigón con una resistencia a compresión de 39 MPa, una relación a/c = 0.5, y un tamaño máximo de agregado (TMA) de 8 mm. Dosificación indicada en la Tabla 2-3.
- (C) **Ensayos realizados:**
- Resistencia a compresión de la matriz (probetas cúbicas de 150 mm de lado)
 - Ensayo de pullout de fibras
- (D) **Configuración del ensayo de pullout: “Single-sided test”**
Probeta del ensayo de pullout es cúbica de 70 mm de lado, con una única fibra embebida (figura 2-6). Las longitudes embebidas de la fibra analizadas fueron 15 mm, 25 mm y 30 mm. El ensayo de pullout fue realizado bajo control de desplazamiento con una velocidad de carga de 0,5 mm/min.

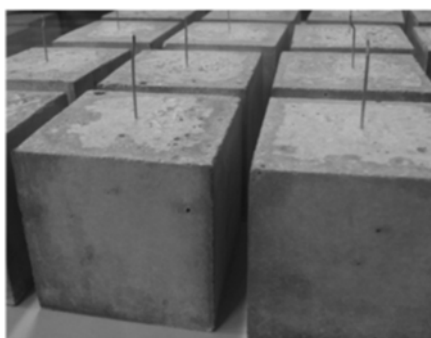


Figura 2-6. Probeta de ensayo de pullout. (Zile & Zile, 2013)

- (E) **RESULTADOS del artículo:** Se desarrolla un modelo simple para simular la contribución mecánica de la geometría de la fibra a la respuesta de extracción (pullout). Esa contribución mecánica depende de la cantidad de trabajo plástico requerido para enderezar la fibra durante la extracción (en función de la geometría del gancho y el esfuerzo de fluencia), y la fricción en las partes curvas que conforman los extremos con ganchos.

| | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Pullout behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes |
| Autores | M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, A. Ferreras |
| Revista | Construction and Building Materials 112 (2016) 607–622 |

El trabajo (Alberti et al., 2016) estudia las macrofibras a base de poliolefina, que han demostrado su buen desempeño para el refuerzo estructural del hormigón con un comportamiento de fractura comparable al de las fibras de acero pero siendo químicamente estable. Su adhesión a la matriz cementicia se ve reforzada por los tratamientos superficiales y las formas en relieve. El trabajo investiga sobre el comportamiento de pullout de las fibras y las propiedades microestructurales de la interfase. El ensayo de pullout se diseñó sincronizando la máquina de ensayo con un dispositivo con video-extensómetro. Las pruebas se realizaron con fibras de poliolefina embebidas en mortero y especímenes de hormigón autocompactantes (HAC). Se utilizaron seis longitudes embebidas, con una inclinación que varía de 0° a 60°.

(A) **Características de las fibras:** macrofibras a base de poliolefina, cuyas características están indicadas en la Tabla 2-4.

(B) **Características de la matriz cementicia (mortero y hormigón HAC):** las proporciones del mortero empleado son 3:1:0,5 (arena normalizada, cemento y agua); y la dosificación del HAC empleada se indica en la Tabla 2-3, siendo su resistencia a la compresión es de 39 MPa.

(C) **Ensayos realizados en el trabajo:**

- Fluidez del mortero y del hormigón
- Resistencia a compresión del hormigón a los 28 días (cilíndricas de 15x30 cm)
- Ensayo de pullout de la fibra
- Análisis de imágenes MEB: Resulta interesante que con las imágenes MEB (Figura 2-7) se puede analizar en detalle la interfaz F-M (continuidad entre el CSH y la fibra, depresiones en la matriz al arrancar la fibra, la superficie de la fibra, etc)

(D) **Configuración del ensayo de pullout: “doble-sided test”**

Para el ensayo del mortero se utilizaron probetas cúbicas de 40x40x40 mm (Figura 2-8). Se analizaron cinco muestras con cada una de las tres longitudes embebidas: 10, 20 y 30 mm. Se usaron fibras de 120 mm de largo (provistas por el fabricante).

Para el ensayo del HAC se fabricaron probetas cilíndricas con diámetro 90 mm y altura 60 mm (Figura 2-9). Se posicionaron las fibras (60 mm largo) con una longitud incrustada de 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm, e inclinación con ángulos de 0°, 15°, 30°, 45° y 60°. Resultaron 30 combinaciones, para cada combinación se realizaron 3 probetas. Para asegurar que el ángulo de incidencia de la fibra y la longitud que sobresale fueran adecuados, previamente a la ejecución de las probetas, se ejecutaron unas “tapas” (en poliestireno expandido) a las cuales se fijaba la fibra.

Máquina de ensayo de pullout (velocidad de carga: 1,2mm/min) sincronizado con un dispositivo con video-extensómetro y análisis de imágenes digitales (software Image-J): Las probetas (de mortero y hormigón) y mordazas se pintaron en negro, además se pintaron manchas blancas en varias posiciones sobre la fibra y las probetas, para lograr un mejor rendimiento del análisis de imagen digital. Sujeción inferior de las probetas mediante un marco metálico (figura 11) fabricado con dos placas de aluminio (10 mm) paralelas, apoyadas en pernos y arandelas de acero inoxidable. Superiormente, una mordaza sujeta la fibra (figura 12).

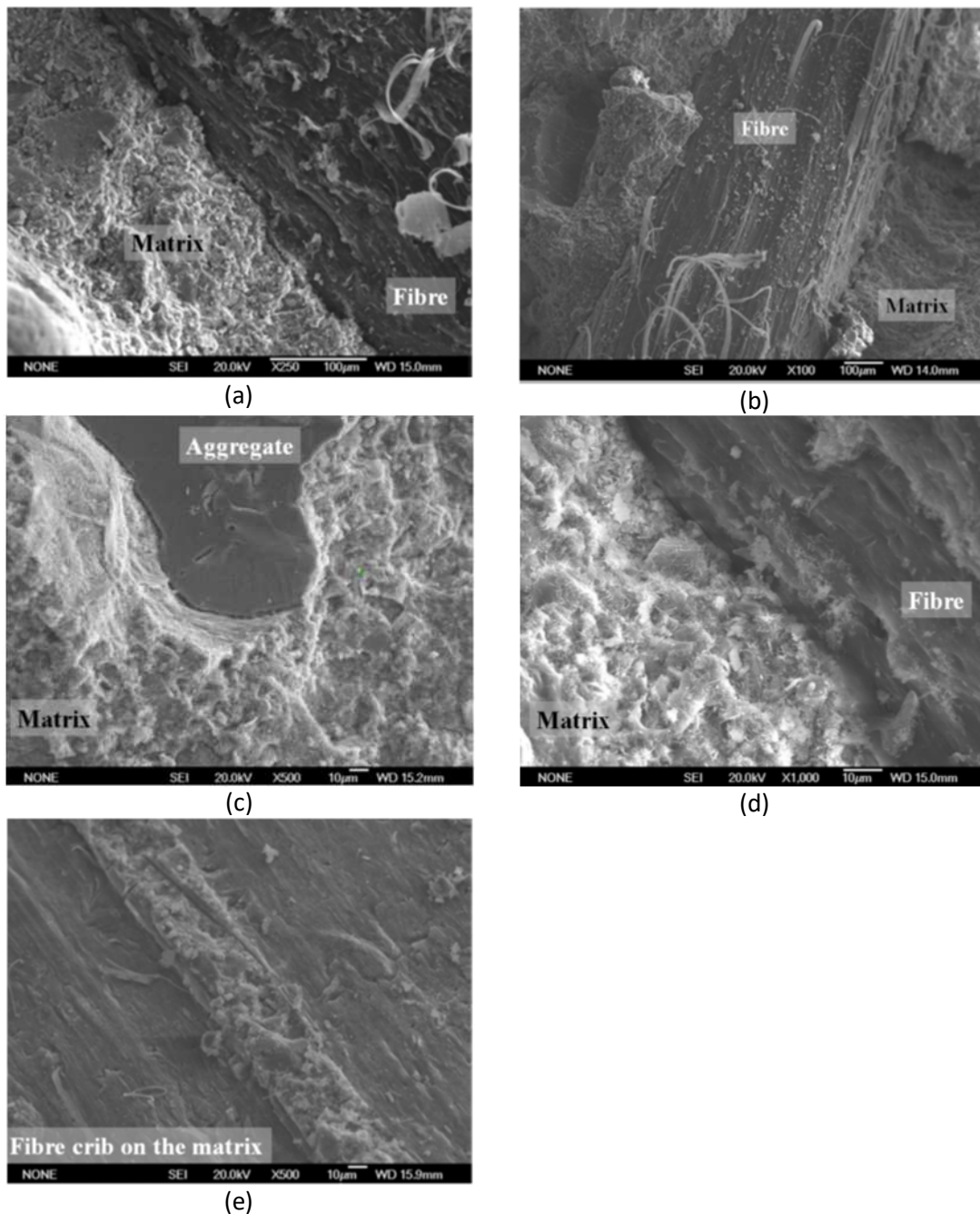


Figura 2-7. Imágenes MEB: (a) Interfaz entre fibra y pasta de cemento; (b) Superficie de la fibra; (c) Interfaz entre agregado y pasta de cemento; (d) Continuidad entre interfaz F-M y la fibra; (e) Detalle de la matriz cuando la fibra es arrancada.

(E) **RESULTADOS del artículo:** Los resultados proporcionaron información significativa sobre la carga de pullout y la energía absorbida en el proceso. Los análisis microestructurales proporcionaron una vista detallada de la interfase entre la fibra de poliolefina y la pasta de cemento. La continuidad entre el CSH y las fibras de poliolefina, mostraron una interfase fibra-matriz in huecos ni discontinuidades.

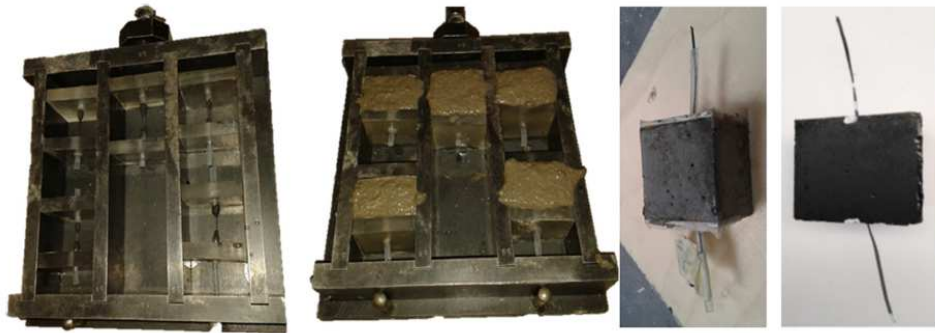


Figura 2-8. Probetas de Mortero. (Alberti et al., 2016)



Figura 2-9. Probetas de HAC: (a) detalle de llenado de las probetas y la "tapa"; (b) probetas endurecidas con las fibras incrustadas. (Alberti et al., 2016)

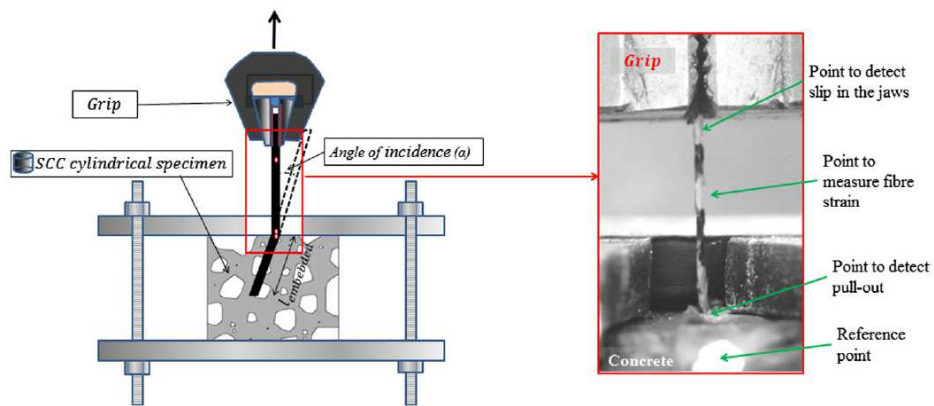


Figura 2-10. Configuración del ensayo de Pullout para probetas de HAC. (Alberti et al., 2016)

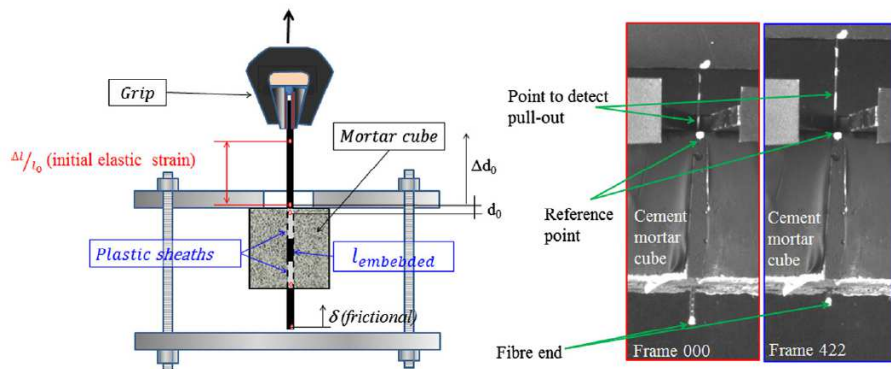


Figura 2-11. Configuración del ensayo de pullout para probetas de mortero. (Alberti et al., 2016)

| | |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials |
| Autores | Z. Wu, C. Shi, K.H. Khayat |
| Revista | Cement and Concrete Composites 71 (2016) 97-109 |

En el trabajo (Wu et al., 2016) se realiza un ensayo “double-side pullout” para evaluar las propiedades de la interfaz F-M, en un mortero UAD con sustitución de 0-25% de humo de sílice por cemento (en peso). El ensayo de pullout incluye la determinación de los siguientes parámetros: relación entre la carga de pullout y el deslizamiento (mm) de la fibra, resistencia de la unión F-M, energía de pullout (tenacidad). Se estudia el efecto de la incorporación del humo de sílice en la matriz (edades: 1, 3, 7, 28 y 91 días) a través de diferentes ensayos detallados a continuación.

(A) **Características de las fibras:** Se utilizan fibras metálicas rectas (diámetro 0,2 mm; longitud 13 mm), cuyas características se indican en la Tabla 2-4.

(B) **Características de la matriz de CEMENTÍCIA (mortero UAD):** Las dosificaciones empleadas se indican en la Tabla 2-3.

(C) **Ensayos realizados en el trabajo:**

- Fluidez de la mezcla
- Calor de hidratación
- Resistencia a compresión y flexión de la matriz (a edades: 1, 3, 7, 28, y 91 días. Probetas 40x40x16 mm)
- Ensayo de pullout de la fibra
- Análisis “Thermo-gravimetry” (TG) y “derivative thermo-gravimetry” (DTG) para estimar cuantitativamente la cantidad de productos de hidratación (CSH y CH) en mortero UAD
- Medición de estructura de poros: “Mercury intrusion porosimetry” (MIP) para medir la estructura de poros de las muestras de HUAD endurecidas
- Microscopia electronica de barrido (MEB) para analizar la calidad de la interfaz F-M
- Medición de micro-dureza o dureza Vickers (MD) para analizar la calidad de la interfaz F-M

(D) **Configuración del ensayo de pullout: “doble-sided test”**

Probetas en forma de “Dog-bone” con cuatro fibras de acero embebidas (Figura 2-12). La probeta se dividió en dos mitades, llamadas “pullout half” (fibra incrustada 5 mm) y “fixed half” (fibra incrustada 8 mm). Las probetas se ensayaron a los 1, 3, 7, 28 y 91 días.

Equipo MTS con una celda de carga de 20 kN (Figura 2-13), según norma china CECS13-2009, y velocidad de carga fue de 1 mm/min. Solo se utilizaron los resultados de aquellas probetas donde las cuatro fibras fueron extraídas de la sección de longitud de inserción más corta (5 mm).

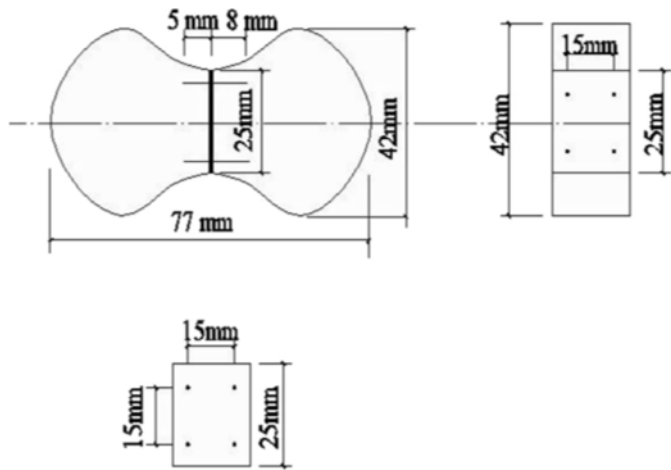


Figura 2-12. Probeta en forma de "Dog-bone" y posición de las fibras. (Wu et al., 2016)

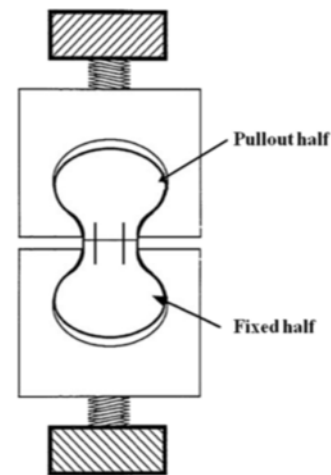


Figura 2-13. Equipo para el ensayo de pullout. (Wu et al., 2016)

(E) **RESULTADOS del artículo:** Las mezclas de HUAD con humo de sílice mostraron una mejora significativa en el comportamiento de pullout. La resistencia de unión fibra-matriz y la energía de pullout (tenacidad) a 28 días aumento entre 170% y 250% en comparación con las muestras de referencia sin humo de sílice. Las observaciones a nivel microestructural verificaron los hallazgos encontrados en el desarrollo de las propiedades a nivel macro. La formación de más cantidad de productos de hidratación y de mayor resistencia, así como el refinamiento de interfaz F-M, aseguraron una mayor micro-dureza y, por lo tanto, mejoraron la unión a la fibra.

| | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Effect of nano and micro-silica on bond behaviour of steel and polypropylene fibres in high volume fly ash mortar |
| Autores | F.U.A. Shaikh, Y. Shafaei, P.K. Sarker |
| Revista | Construction and Building Materials 115 (2016) 690–698 |

Este trabajo (Shaikh et al., 2016) estudia el efecto de nano sílice (NS), micro sílice (MS) y la combinación NS y MS en el comportamiento de la unión de fibras de acero y de polipropileno (PP) con mortero con alto contenido de ceniza volante (ACCV, o su sigla en inglés HVFA). Se emplearon tres tipos de configuración de doblado de los extremos con gancho de fibras metálicas disponibles comercialmente y una fibra de polipropileno (PP) ondulada. Se utilizaron tres contenidos diferentes de ceniza volante (CV) (40%, 50%, 60% en peso) como sustitución parcial del cemento Portland normal, en morteros ACCV, y también se consideró un mortero con 100% de cemento Portland. Se utilizó un 2% de NS y 10% de MS (en peso) como sustitución parcial del cemento Portland, en un mortero ACCV conteniendo 40% de ceniza volante.

(A) **Características de las fibras:** Las fibras a ser analizadas fueron una fibra de polipropileno (PP) ondulada y tres tipos de configuración de doblado de los extremos con gancho de fibras metálicas (denominadas como doble curvado, triple curvado, cuádruple curvado) según se observa en la Figura 2-14. Las características físicas y mecánicas de las fibras están indicadas en la Tabla 2-4.

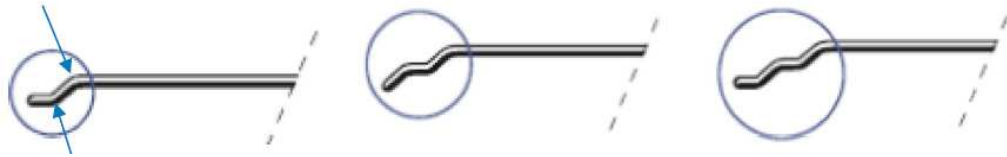


Figura 2-14. Configuraciones de tres tipos de extremo con gancho de las fibras metálicas (doble, triple y cuádruple curvado).(Shaikh et al., 2016)

(B) **Características de la matriz (mortero ACCV):** Las mezclas de mortero se prepararon con una relación agua/aglomerante constante de 0,4 y una relación arena/aglomerante de 2. Las características de las dosificaciones están indicadas en la Tabla 2-3. Se consideraron siete tipos de morteros en total: la referencia con 100% de cemento portland y arena, y seis mezclas de morteros ACCV con 40%, 50% y 60% de CV, con 38% de CV + 2% NS, con 30% de CV + 10% MS, con 28% de CV + 2% NS + 10% MS. Se evaluaron los efectos de NS, MS y NS-MS combinados sobre el comportamiento de unión de las fibras de acero y PP en el mortero ACCV que contiene 40% de cenizas volantes.

(C) **Ensayos realizados en el trabajo:**

- Fluidez de los morteros
- Resistencia a compresión a los 7 y 28 días (cubos de 50 mm de lado)
- Ensayo de pullout de las fibras a los 7 y 28 días
- Mercury Intrusion Porosity (MIP) para evaluar la porosidad de la matriz (mediante la incorporación de NS, MS y NS-MS) y su influencia en la unión fibra-matriz (analizado a los 7 y 28 días de edad)

(D) **Configuración del ensayo de pullout: "single-sided test"**

Probetas de dimensiones 12x24x42 mm (Figura 2-15).

Configuración del ensayo de pullout se muestra en la Figura 2-16. La celda de carga del equipo de ensayo tiene una capacidad de 5 kN, se aplicó a una velocidad de carga de 1 mm/min. Se registraron las curvas de carga de pullout frente al desplazamiento de la fibra, para cada serie de mortero. En base a esas curvas, se calcularon los siguientes parámetros: la carga de pullout máxima (pico), el desplazamiento correspondiente a la carga de pullout máxima, tensión en la unión fibra-matriz y la energía de absorción (área bajo la curva de carga-desplazamiento de pullout).



Figura 2-15. Elaboración de probetas a ser ensayadas por pullout.(Shaikh et al., 2016)



Figura 2-16. Configuración del ensayo de pullout.(Shaikh et al., 2016)

(E) RESULTADOS del artículo:

Los resultados indican que la fuerza máxima de pullout de las fibras de acero y PP disminuye con el aumento del contenido de ceniza volante en los morteros ACCV a los 7 y 28 días. La adición de 2% de NS y 10% de MS mostró una mejora casi similar en la fuerza máxima de pullout de las fibras de acero y PP en ambas edades en morteros ACCV que contienen 40% de cenizas volantes. El uso combinado de 2% NS + 10% MS también mejoró la fuerza máxima de pullout y siendo mayor que en los casos con 2% NS y 10% MS. Ello se debe a la reducción en los poros capilares grandes en los morteros ACCV que contienen nano y micro sílice, observados en la prueba de MIP, mejoró la unión de las fibras de acero y PP en esos morteros debido a la formación adicional de silicato de calcio hidratado (CSH).

La fuerza máxima de pullout también aumentó con el aumento en el número de curvas en el extremo del gancho de las fibras de acero, dicho comportamiento se mantuvo para todos los morteros ensayados a los 7 y 28 días. La energía adicional absorbida debido al mayor número de curvas en los extremos de las fibras metálicas es la razón de tal mejora en la fuerza máxima de pullout. Se observaron buenas correlaciones entre las fuerzas máximas de pullout de los tres tipos de fibras de acero con la resistencia a la compresión de los morteros, lo cual muestra una fuerte influencia en el comportamiento de la unión entre ambos.

| | |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Influence of concrete strength and steel fibre geometry on the fibre/matrix interface |
| Autores | T. Simoes, C. Octavio, J. Valença, H. Costa, D. Dias-da-Costa, E. Júlio |
| Revista | Composites Part B 122 (2017) 156e164 |

El estudio (Simões et al., 2017) apunta a evaluar el comportamiento de la interfaz F-M, considerando un conjunto de fibras (orientación única) embebidas en hormigón, frente a la influencia de los siguientes parámetros: resistencia a compresión de la matriz; geometría de la fibra (ganchos, diámetro y largo). Se diseñaron tres matrices de hormigón con diferente resistencia a compresión y se usaron dos tipos de fibras de acero con gancho. Se realizaron ensayos de pullout y además se realizó un modelado numérico en base a los resultados obtenidos.

- (A) **Características de las fibras:** Se utilizaron fibras de acero con terminación de gancho de dos tipos de fibras comerciales (Figura 2-18). Las propiedades de dichas fibras se indican en la Tabla 2-4. A pesar que tienen diferente largo, diámetro y resistencia a tracción, ambas fibras tienen la misma esbeltez.



Figura 2-17. Fibras de acero: (a) Dramix 3D; (b) Dramix 5D (Fuente: www.bekaert.com)

- (B) **Características de la matriz cementicia (hormigón sin agregado grueso):** Se utilizaron tres matrices con diferente resistencia a compresión: 20 MPa, 60 MPa y 100 MPa. Las características de las dosificaciones están indicadas en la Tabla 2-3.

(C) Ensayos realizados en el trabajo:

- Ensayo de pullout de la fibra a los 28 días
- Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de la matriz a los 28 días

(D) Configuración del ensayo de pullout: “doble-sided test” con un conjunto de fibras con orientación única

Probetas: dos cubos de hormigón, de 10 cm de lado y sin estar adheridos entre sí, conectados solamente por un conjunto de fibras orientadas en una única dirección. Se colocaron 16 fibras igualmente espaciadas entre ellas (Figuras 2-19-a, 2-19-b y 2-19-c). En cada cubo de hormigón de la probeta, se colocó una varilla roscada de acero para aplicar la carga de tracción durante el ensayo. Se prepararon tres series de ensayos: fibras Dramix 3D con extremo cortado (longitud embebida 13 mm); fibras Dramix 5D con extremo cortado (longitud embebida 23 mm); fibras Dramix 3D con ganchos (longitud embebida 23 mm). Cada serie fue elaborada con los tres tipos de matrices (20, 60 y 100 MPa). Se ejecutaron 2 probetas por serie.

Equipo: carga aplicada con transmisor de fuerza servo-hidráulico, con una velocidad de carga de 0,50 mm/min. Se utilizaron cuatro transductores LVDT y control por fotogrametría, permitiendo medir el desplazamiento entre caras (Figura 2-20).

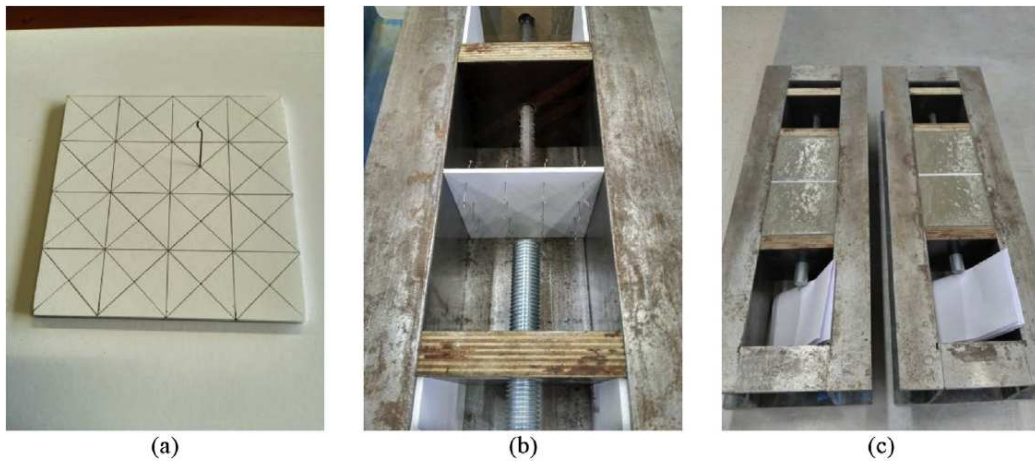


Figura 2-18. Producción de probetas de ensayo: (a) colocación de las fibras en el cartón-espuma; (b) posicionamiento del cartón-espuma en el molde; (c) colocación del hormigón en el molde. (Simões et al., 2017)

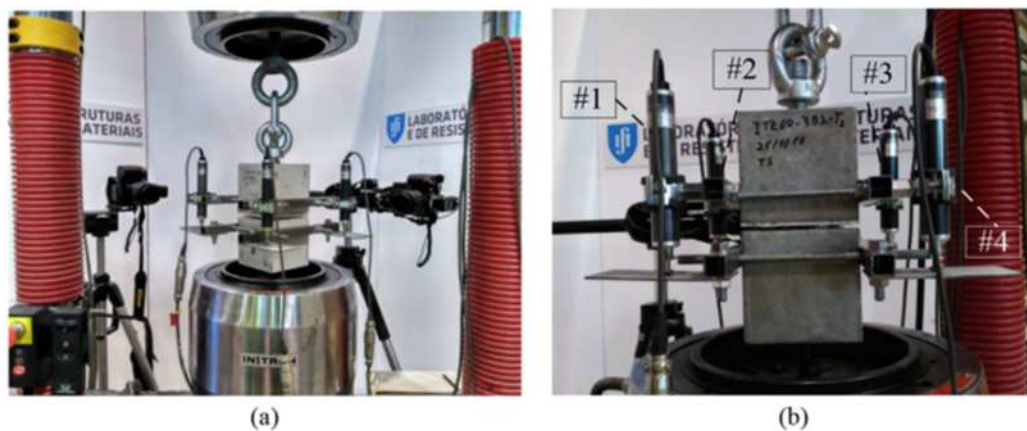


Figura 2-19. Configuración del ensayo pullout: (a) con varios sistemas de adquisición de la información; (b) identificación de los LVDT. (Simões et al., 2017)

- (E) **RESULTADOS del artículo:** Se concluye que la resistencia a la compresión del hormigón influye fuertemente en la resistencia de la fibra-matriz. Las fibras con terminaciones en gancho alcanzaron resistencias más altas, que las rectas, para las diferentes resistencias de hormigón. Para fibras con terminaciones rectas, el aumento del diámetro y la longitud conducen a una mayor adherencia y resistencia a la fricción.

| | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Effect of elevated temperature on pullout behaviour of 4DH/5DH hooked end steel fibres |
| Autores | S. Abdallah, M. Fan, D.W.A. Rees |
| Revista | Composite Structures 165 (2017) 180-191 |

El trabajo (Abdallah et al., 2017) estudia el efecto de altas temperaturas (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 °C) en el mecanismo de unión asociado al comportamiento de pullout de fibras de acero con gancho embebidas en cuatro hormigones diferentes: hormigón de resistencia normal, hormigón de resistencia media, hormigón de alta resistencia y mortero de ultra-alto desempeño (UAD). Se investigó la influencia de la temperatura elevada en las propiedades mecánicas y térmicas del hormigón.

- (A) **Características de las fibras:** Se utilizaron dos tipos de fibras comerciales con extremos con ganchos diferentes. Las fibras tienen la misma longitud, diámetro y relación de aspecto, pero difieren en la geometría de los extremos de los ganchos y la resistencia a tracción (Figura 2-20). Las características físicas y mecánicas de las fibras están indicadas en la Tabla 2-4.



Figura 2-20. Geometría de las fibras metálicas con gancho. (Abdallah et al., 2017).

- (B) **Características de la matriz (hormigón):** Se emplearon cuatro matrices diferentes de hormigón, hormigón de resistencia normal (33 MPa), hormigón de resistencia media (54 MPa), hormigón de alta resistencia (71 MPa) y mortero de ultra-alta resistencia (148 MPa). Se emplearon dos tipos de cementos Portland normales (32,5 y 52,5 MPa). Se utilizó humo de sílice, cuarzo molido y ceniza volante para la preparación de los tres hormigones de mayor resistencia. El agregado grueso granito triturado TMA 10 mm. Se usaron dos tipos de arenas: una arena gruesa (0-4 mm) para los primeros tres hormigones y una arena muy fina (150–600 μm) para el mortero de ultra-alta resistencia. Las dosificaciones utilizadas están indicadas en la Tabla 2-3.

(C) **Ensayos realizados en el trabajo:**

- Ensayo de resistencia a compresión (probetas de 100x100x100 mm)
- Ensayo de pullout de fibras de acero
- Sometimiento a períodos de altas temperaturas (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 and 800 °C) (probetas de 100x100x100 mm), análisis de la resistencia a compresión y pérdida de masa.

(D) **Configuración del ensayo de pullout:** “single-sided test”

Probetas: para los tres primeros hormigones fueron cúbicas de 100x100x100 mm conteniendo 4 fibras embebidas; para mortero UAD fueron cilindros de diámetro 100

mm y altura 50 mm, conteniendo una sola fibra embebida. Longitud de la fibra embebida: 30 mm. Se elaboraron tres probetas por cada mezcla.

Equipo de ensayo universal Instron 5584. La velocidad de carga 0,6 mm/min. Se usaron dos transductores LVDT para medir la distancia recorrida por la fibra de acero en relación con la cara de hormigón durante el ensayo (Figura 2-21). Las muestras se analizaron a los 90 ± 2 días de edad.

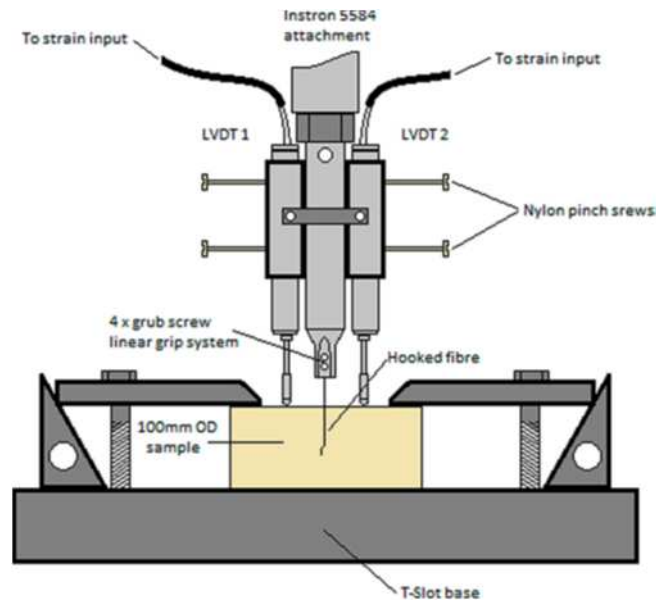


Figura 2-21. Configuración del ensayo de pullout. (Abdallah et al., 2017)

- (E) **RESULTADOS del artículo:** Los resultados mostraron que la respuesta de pullout de ambas fibras no varía significativamente a lo largo del rango de temperatura de 20–400 °C, pero dentro del rango de temperatura de 600–800 °C, la resistencia de pullout disminuye significativamente para todos los hormigones. La contribución del anclaje mecánico proporcionado por la fibra con gancho con doble curvatura es significativamente mayor que la de la fibra de gancho con simple curvatura, especialmente para hormigones de mayor resistencia. La reducción en la resistencia de la unión fibra-matriz, para ambos tipos de fibras, después de una exposición a temperatura elevada se correlaciona estrechamente con la degradación en la resistencia a la compresión de los hormigones.

| | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|
| Título | Time-dependent pullout behaviour of hooked-end steel fibres in concrete |
| Autores | P.D. Nieuwoudt, W.P. Boshoff |
| Revista | Cement and Concrete Composites 79 (2017) 133e147 |

En este estudio (Nieuwoudt & Boshoff, 2017) se investigó el comportamiento de pullout de las fibras de acero con gancho embebidas en hormigón, tanto bajo carga sostenida (largo plazo) como bajo carga instantánea de pullout (corto plazo) a diferentes velocidades de carga. Se consideraron cuatro velocidades de carga para el ensayo de pullout que van desde 150 mm/min hasta 0,015 mm/min. Además, se propone un modelo que permite simular el comportamiento de pullout de una única fibra en función del tiempo (a corto y largo plazo).

(A) **Características de las fibras:** Se utilizaron dos tipos de fibras de acero con gancho y rectas (obtenidas de cortar las fibras con gancho), cuyas características están indicadas en la Tabla 2-4.

(B) **Características de la matriz (hormigón):** Se empleó una matriz de hormigón con una resistencia a compresión de 51 MPa, la dosificación empleada se indica en la Tabla 2-3, y los componentes utilizados fueron: Cemento Portland CEM I 52.5N, superplastificante (0,5% del peso del cemento), agua, dos tipos de agregado (arena natural con un módulo de finura de 2,3 y piedra partida gris de 6 mm).

(C) **Ensayos realizados en el trabajo:**

- Fluidez de la mezcla
- resistencia a compresión de la matriz (probetas cúbicas de 100 mm de lado)
- **Configuración #1:** Ensayo de pullout a diferentes velocidades de carga (0,015-0,15-1,5-150 mm/min) de una única fibra (con gancho y rectas) (Figuras 2-22a y 2-23).
- **Configuración #2:** Ensayo de carga sostenida en el tiempo (período de 249 días) de una única fibra de acero (con gancho) para evaluar la deformación por fluencia lenta por pullout. (Figuras 2-22b y 2-24).

(D) **Configuración del ensayo de pullout (Configuración #1): “single-sided test”**

Probetas de dimensiones 40x100x100 mm (Figura 2-22a). La longitud embebida 15 mm.

Equipo (Figura 2-23) de ensayo universal Zwick Z250 que tiene una capacidad de 250 kN, con celda de carga de 500 kg conectada en serie. El deslizamiento durante el ensayo de pullout se midió con transductores LVDT.

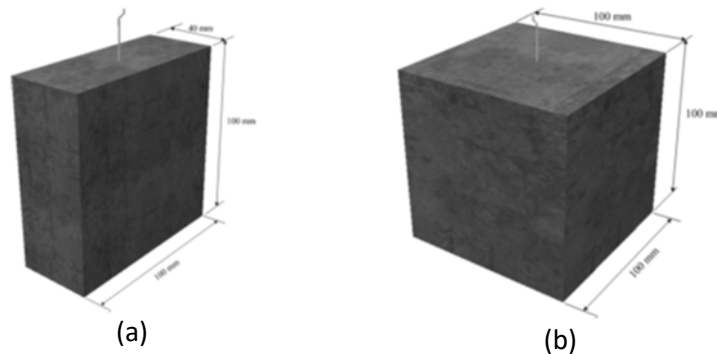


Figura 2-22. Dimensiones de la probeta: (a) ensayo de pullout (config. #1); (b) ensayo de carga sostenida (config. #2). (Nieuwoudt & Boshoff, 2017)

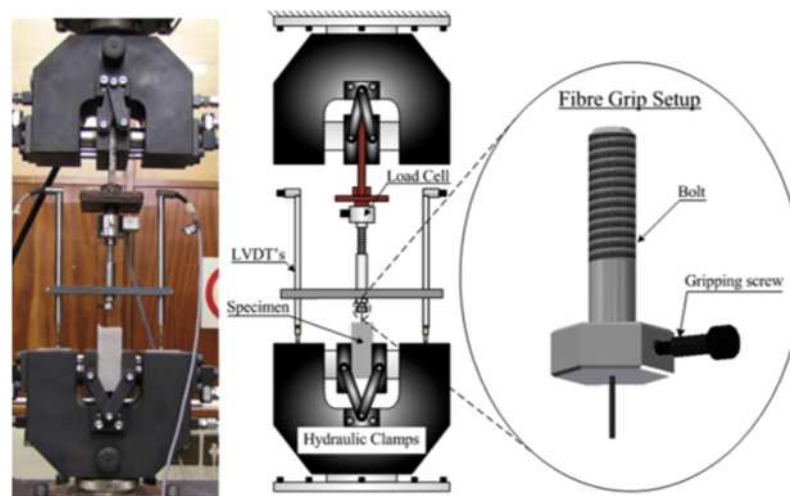


Figura 2-23. Configuración (#1) del ensayo de pullout. (Nieuwoudt & Boshoff, 2017)

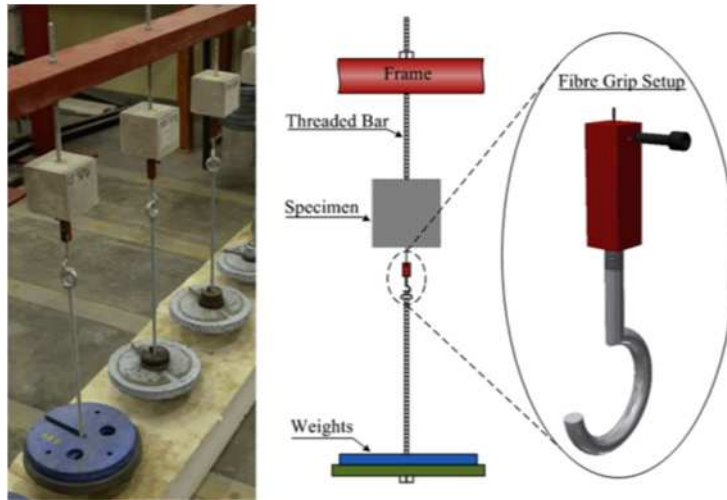


Figura 2-24. Configuración (#2) del ensayo de carga sostenida. (Nieuwoudt & Boshoff, 2017)

(E) **RESULTADOS del artículo:** Se concluyó que las fibras de acero rectas presentan muy poca sensibilidad frente a los cambios en la velocidad de carga, mientras que, para las fibras con gancho si lo hicieron (debido al anclaje mecánico de la fibra con la matriz). Por otra parte, las pruebas de carga sostenida mostraron que la fluencia de extracción está relacionada con la carga aplicada. El deslizamiento de la fibra durante el ensayo aumenta linealmente hasta una carga del 50% de la fuerza de extracción máxima promedio. Para cargas sostenidas más altas, la fluencia de extracción aumenta exponencialmente (debido a la microfisuración de la matriz).

| | |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | The pullout behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling |
| Autores | F. Deng, X. Ding, Y. Chi, L. Xua, L. Wang |
| Revista | Composite Structures 206 (2018) 693–712 |

El trabajo (Deng et al., 2018) estudia la interfase de unión de la fibra de acero en un compuesto cementicio reforzado con fibra híbrida de acero y polipropileno. Se evaluaron 42 grupos de muestras de fibra de acero rectas (21 grupos) y de extremo con gancho (21 grupos), fueron analizadas mediante el ensayo de pullout de un solo lado e imágenes MEB. Además, se desarrolla un modelo teórico para predecir el comportamiento pullout teniendo en cuenta el efecto de fibra híbrida. Se registró la respuesta de la carga de pullout vs. deslizamiento y se analizaron los efectos de los siguientes parámetros:

- Dosificación de fibra híbrida dentro de la matriz: fibras metálicas (0; 0,5%; 1%; 1,5%) y filamentos de polipropileno (0; 0,05%; 0,1%; 0,15%).
- Geometría y tipo de fibra: dos tipos geométricos de fibra de acero para ser incluidos en la matriz: recta y con gancho. (La fibra de acero usada en el ensayo de pullout y las fibras de acero distribuidas en matriz son del mismo tipo)
- Longitud de la fibra “embebida”: 10 mm, 20 mm y 30 mm
- Resistencia a compresión de la matriz (hormigón): 40 MPa y 50 MPa.

- (A) **Características de las fibras:** dos tipos de fibra de acero (recta y con gancho). La fibra de acero usada en el ensayo de pullout y las fibras de acero distribuidas en matriz son del mismo tipo. Las características físicas y mecánicas de las fibras están indicadas en la Tabla 2-4. La fibra usada para el ensayo de pullout se fabricó especialmente con una longitud de 80 mm de largo.
- (B) **Características de la matriz (hormigón):** Las características de las dosificaciones están indicadas en la Tabla 2-3. Las características de los materiales empleados: Cemento: CPN 42,5, arena natural de río (MF 2.7), agregado grueso 5-20mm, superplastificante a base de policarboxilatos, fibras metálicas y/o de polipropileno incluidas en la matriz (especificaciones de las fibras incluidas en la Tabla 2-4). En la Figura 2-25 se muestra un esquema de las probetas (con y sin fibras dentro de la matriz).

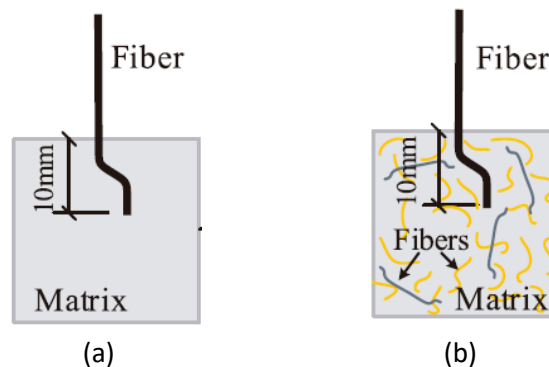


Figura 2-25. Esquema de la probeta de ensayo de pullout: (a) matriz sin fibras; (b) matriz con fibras (M y/o PP).(Deng et al., 2018)

(C) Ensayos realizados en el trabajo:

- resistencia a compresión de la matriz (3 probetas cúbicas de 150 mm de lado)
- resistencia a la tracción de la matriz (3 probetas cúbicas de 150 mm de lado)
- ensayo de pullout
- Imágenes MEB para determinar el mecanismo de unión de la interfase F-M y el mecanismo de refuerzo de fibra.

(D) Configuración del ensayo de pullout: "single-sided test"

Probetas: 3 probetas cúbicas de hormigón (100×100×100mm) Figura 2-26.

Equipo: Prensa MTS servo-hidráulica controlado por deformación (Figura 2-27), velocidad de carga constante de 0,48 mm/min, celda de carga asociada a la prensa con capacidad de 20 kN. Se analizan las curvas carga pullout (N) Vs. deslizamiento (mm) y se determina: la carga máxima, la carga residual promedio y energía de disipación de pullout. Cuenta con un sistema de sujeción de la probeta (matrix grip) en acero inoxidable, diseñada especialmente.

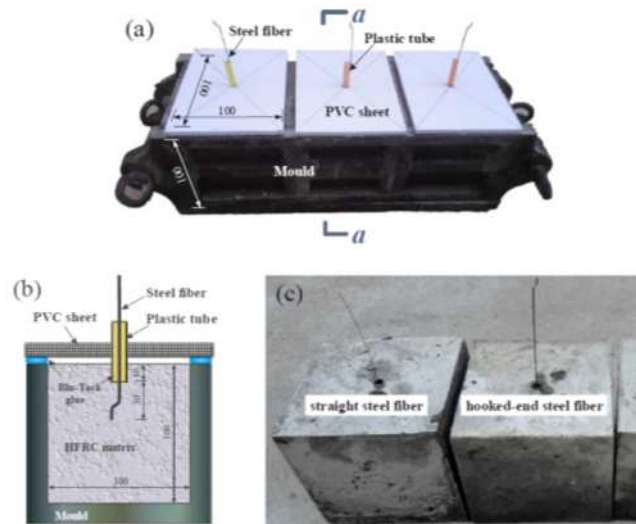


Figura 2-26. Esquema de la probeta de ensayo de pullout. (a) moldes de las probetas; (b) sección transversal a-a (mm); (c) probeta ensayada por pullout. (Deng et al., 2018)

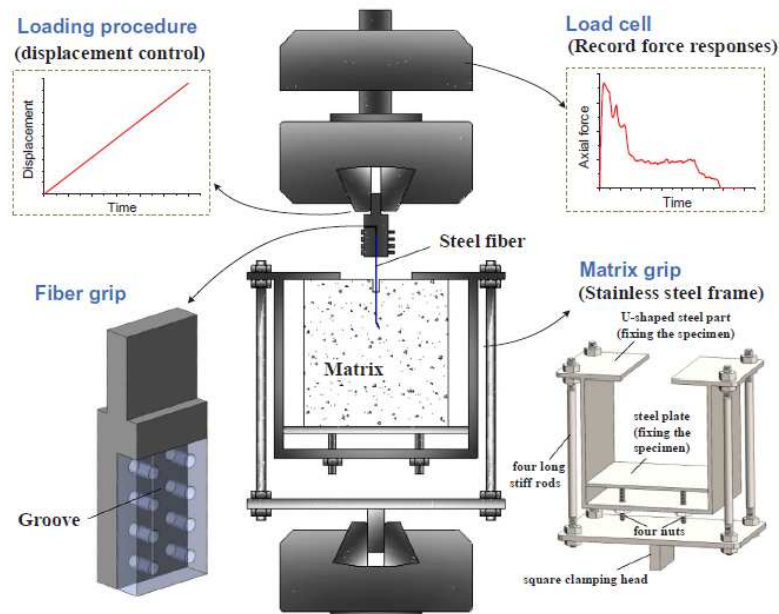


Figura 2-27. Esquema de la configuración del ensayo de pullout. (Deng et al., 2018)

(E) **RESULTADOS del artículo:** La inclusión de fibras híbridas en la matriz tiene efectos positivos en mejorar el comportamiento de las fibras de acero frente al pullout, incrementando la carga máxima (el doble en fibras rectas; un 30% en fibras con gancho). En este sentido, el uso de fibras PP tienen un mejor desempeño que las fibras de acero, mejorando la carga pullout máxima y residual, así como también la energía de disipación (para ambos tipos de fibras). El efecto de la longitud embebida de las fibras y la resistencia de la matriz en el comportamiento de pullout de la fibra en matrices de HRF es similar que en el hormigón convencional. Fibras rectas: la fuerza de fricción deslizando es menos sensible a la adición de fibra en comparación con la adhesión química. Fibra de acero con extremo en gancho: el efecto de refuerzo de la adición de fibra híbrida no es significativo en el “interlocking” mecánico del gancho, éste último es el que gobierna la carga máxima de pullout. A través de las imágenes MEB se confirma que las fibras de PP son más efectivas que las fibras de acero en el comportamiento de pullout.

| | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO ₃ particles |
| Autores | Z. Wu, C. Shi, K.H. Khayat |
| Revista | Cement and Concrete Composites 86 (2018) 255-265 |

Los autores del trabajo (Wu, Shi, et al., 2018) afirman que las propiedades mecánicas de un hormigón reforzado con fibra están estrechamente relacionadas con las propiedades de la matriz, la fibra y la interfaz F-M. La unión F-M se rige principalmente por la adhesión entre la fibra y los materiales de cemento circundantes, así como la resistencia de los materiales en la zona de transición de la interfase. En el trabajo se estudia el efecto de la incorporación de nano-CaCO₃ (NC), con sustituciones entre 0-6.4% (por peso de material cementante) en:

- el desarrollo de la microestructura de la matriz de hormigón de HUAD sin fibra,
- propiedades de unión de la interfase F-M (resistencia de la unión y la energía de pullout)
- propiedades mecánicas del hormigón UAD reforzado con fibras de acero al 2%

El objetivo es mejorar las propiedades mecánicas del hormigón UAD a través de la optimización de las propiedades y microestructura de la interfaz F-M, que finalmente repercuten en la performance del HUAD.

- (A) **Características de las fibras:** Se utilizaron fibras de acero rectas con recubrimiento “brass-coated” (diámetro 0,2 mm y largo 13 mm), cuyas características están indicadas en la Tabla 2-4.
- (B) **Características de la matriz de cementicia (hormigón UAD):** Se prepararon 5 mezclas de HUAD con sustitución de cemento por nano-CaCO₃ en diferentes porcentajes (0; 1,6%; 3,2%; 4,8%; 6,4%). A esas mismas mezclas se le incorporaron un 2% de fibras metálicas (en volumen de hormigón) buscando lograr una fluidez similar (sin compactación) ajustando la cantidad de aditivo superplastificante. Las características de los componentes de la matriz se detallan a continuación (Tabla 2-3): Cemento portland de 42,5 MPa, relación a/agl = 0,18, humo de sílice, nano-CaCO₃, arena natural de río (TMA 2,36 mm y MF 3,0), aditivo superplastificante a base de polycarboxilatos, fibras metálicas agregadas en la matriz (características indicadas en la Tabla 2-4).
- (C) **Ensayos realizados en el trabajo:**
- Matriz: fluidez, resistencia a flexión (3 probetas de 40x40x160 mm con control de deformación), resistencia a compresión (6 probetas de 40x40x40 mm)
 - para caracterizar la interfaz F-M a nivel macroestructura: ensayo de pullout fibra
 - Para caracterizar la microestructura de la matriz y/o la zona de interfaz F-M se utiliza: Mercury intrusion porosimetry (MIP), Microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía óptica (MO), micro-dureza o dureza Vickers (MD)
- (D) **Configuración del ensayo de pullout:** “doble-sided test”, misma configuración utilizada por (Wu et al., 2016)
- (E) **RESULTADOS del artículo:** La incorporación de 3,2% de nano-CaCO₃ mejoró significativamente las propiedades de enlace de la unión F-M y las propiedades de flexión de HUAD. Esto se atribuyó a la densificación y la mejora de la resistencia de interfaz F-M como se observa en los análisis microestructurales. Más allá de un contenido superior al 3,2% de nano-CaCO₃, el enlace de unión F-M y las propiedades mecánicas de HUAD disminuyeron debido a la mayor porosidad asociada con la aglomeración del nano-CaCO₃.

| | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC? |
| Autores | Z. Wu, K. H. Khayat, C. Shi |
| Revista | Cement and Concrete Composites 90 (2018) 193-201 |

En el trabajo (Wu, Khayat, et al., 2018) se investigaron las propiedades de unión de la interfase entre las fibras de acero con diferentes formas (fibras rectas, con gancho y onduladas) y matrices HUAD dosificadas con humo de sílice (15% a 20% en peso de cemento) en diferentes tiempos de curado (3, 7, 28, y 91 días). También se evaluaron las propiedades de flexión de HUAD reforzado con 2% de fibras con diferentes formas. Para caracterizar la microestructura de la matriz y/o la interfaz F-M se emplearon: porosimetría de intrusión de mercurio (MIP), microscopía electrónica de barrido (MEB) y Termo-gravimetría (TG). Se estableció la resistencia de la unión F-M en relación con el contenido de hidróxido de calcio de la matriz HUAD o con la resistencia a la flexión de HUAD.

- (A) **Características de las fibras:** 3 tipos de fibras metálicas (brass-coated) incluyendo fibras rectas, con gancho y onduladas, todas ellas con un diámetro de 0,2 mm y un largo de 13 mm, (características indicadas en la Tabla 2-4).
- (B) **Características de la matriz (HUAD):** Se elaboraron dos matrices (sin fibras) con 15% y 20% de humo de sílice (HS) según (Wu et al., 2016), y luego a la matriz con 20% de humo de sílice se le incorporó 2% de fibras (HUAD) (con los tres tipos de fibras por separado). Las características de las dosificaciones están indicadas en la Tabla 2-3.
- (C) **Ensayos realizados en el trabajo:** “doble-sided test”
- Ensayos sobre la matriz cementicia HUAD: fluidez, resistencia a flexión (probetas de 40×40×160 mm con control de deformación), resistencia a compresión.
 - Ensayo de pullout de la fibra
 - Mercury intrusion porosimetry (MIP)
 - Microscopía electrónica de barrido (MEB)
 - Termogravimetría (TG) para determinar el contenido de hidróxido de calcio (CH)
- (D) **Configuración del ensayo de pullout:** “doble-sided test”, misma configuración utilizada por (Wu et al., 2016), pero en este caso las cuatro fibras estaban embebidas en la matriz de HUAD.
- (E) **RESULTADOS del artículo:** Los resultados de las pruebas mostraron que las fibras onduladas y con gancho mejoraron significativamente las propiedades de unión entre 3 y 7 veces en comparación con aquellas con fibras rectas. La resistencia a la flexión de HUAD con fibras onduladas y con gancho aumentó en un 8%-28% y 17%-50%, respectivamente. Los resultados a nivel microestructural (MIP, MEB y TG) confirmaron el cambio en las propiedades de la unión de la interfaz F-M. La resistencia de unión de las fibras rectas aumentó exponencialmente con la disminución del contenido de hidróxido de calcio.

| | |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Título | Effect of the displacement rate and inclination angle in steel fiber pullout tests |
| Autores | M. Tarifa; E. Poveda; V. Cunha; J.Barros |
| Revista | International Journal of Fracture 223 (2020) 109-122 |

En el trabajo (Tarifa et al., 2020) se investigó las propiedades de unión de la interfase entre las fibras de acero con diferentes formas (fibras rectas, con gancho) y una matriz de HAC, variando

la velocidad de extracción por desplazamiento (estática de 0.01 mm/s hasta velocidades dinámicas de 0.1 y 1 mm/s.) y el ángulo de inclinación (0° , 30° y 60°) de las fibras

- (A) **Características de las fibras:** 2 tipos de fibras metálicas con gancho (diámetro de 0,75 mm y largo de 60 mm) y rectas con un largo de 55mm (obtenidas cortando el gancho),
- (B) **Características de la matriz (HAC):** Hormigón autocompactante con una resistencia a compresión de 86MPa.
- (C) **Ensayos realizados en el trabajo:** “single-sided test”
 - Ensayos sobre la matriz cementicia HAC: ensayos de cono de flujo, resistencia a compresión.
 - Ensayo de pullout de la fibra
- (D) **Configuración del ensayo de pullout:** “single-sided test con fibra aislada.

RESULTADOS del artículo: Los resultados han demostrado que la carga máxima de extracción aumenta con el ángulo de inclinación, en particular para las fibras rectas. Además, las velocidades de desplazamiento más altas condujeron a una mayor capacidad de absorción de energía para la extracción de las fibras rectas, mientras que la absorción de energía permaneció casi estable para las fibras con extremos en forma de gancho.

2.3 Síntesis relativa al ensayo de pullout de fibras.


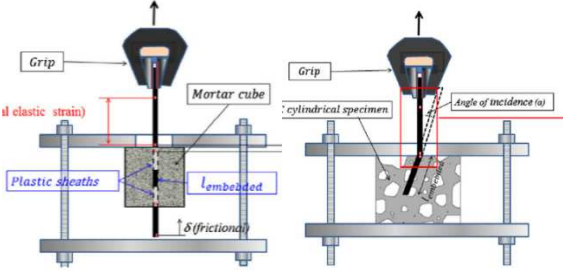

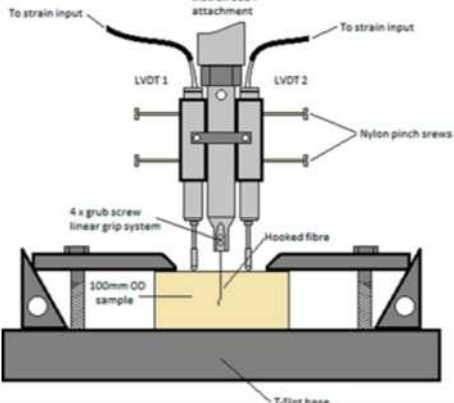
Como fuera mencionado, el ensayo de pullout de fibras no está normalizado y en la literatura científica se identifican diferentes configuraciones y adaptaciones del mismo. La clasificación de los tipos de ensayos de pullout de fibra, planteada inicialmente por (Gray, 1983) y actualizada por (Abbas & Iqbal Khan, 2016), está basada en la combinación de dos criterios, según el número de fibras embebidas a ensayar (una o múltiples fibras) y según el método de aplicación de la fuerza de tracción sobre la probeta (single-sided o doble-sided test), dando como resultado cuatro configuraciones del ensayo: (i) “single-sided test” - una fibra ; (ii) “single-sided test” - múltiples fibras; (iii) “doble-sided test” - una fibra; (iv) “doble-sided test” - múltiples fibras.

En base a la revisión de artículos científicos presentada en la última parte de la sección anterior, se identificaron que las configuraciones del ensayo de pullout adoptadas corresponden a las modalidades de “single-sided test” - una fibra y “doble-sided test” - múltiples fibras, sintetizadas en las Tablas 2-1 y 2-2 respectivamente.

Por otra parte, se elaboraron las Tablas 2-3, 2-4 y 2-5 donde se identifica y recopila información sobre el tipo de matriz empleada (características de materiales y dosificaciones), tipo y características de las fibras utilizadas, y la identificación de ensayos llevados a cabo (sobre la matriz y la interfaz F-M), respectivamente.

El análisis anterior sirvió de base para la evaluación de los diferentes parámetros involucrados, las técnicas de caracterización de la interfaz F-M, y las distintas configuraciones del ensayo de pullout. A partir de lo cual, se seleccionó el tipo de matriz cementicia a utilizar (microhormigón) y las variables intervinientes en ella, el tipo de fibra a utilizar, las técnicas de caracterización de la interfaz F-M a desarrollar y, en particular, se adoptaron dos configuraciones diferentes del ensayo de pullout que se emplearon durante el desarrollo experimental, teniendo en cuenta los medios y equipamientos disponibles. La metodología seguida en la campaña experimental es desarrollada en el tercer capítulo de la Tesis de Maestría.

Tabla 2-1. Diferentes configuraciones del ensayo de pullout de fibras: en la modalidad de "single-sided test" con una sola fibra.

| Configuración del Ensayo | Referencia Bibliográfica | Observaciones |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | (Zile & Zile, 2013) | Fibras de acero rectas cortadas, con gancho 50 y 60 mm; onduladas de 60 mm Matriz: hormigón 39 MPa |
|  <p style="text-align: center;">Probeta de mortero / Probeta de HAC</p> | (Alberti et al., 2016) | Fibras de poliolefina de 60 mm Matriz: mortero y HAC |
|  | (Shaikh et al., 2016) | Fibras de acero con 3 tipos de gancho de 60 mm Fibras de polipropileno onduladas de 65 mm Matriz: mortero con contenidos altos de humo de sílice |
|  | (Abdallah et al., 2017) | Fibras de acero con 2 tipos de gancho de 60 mm Matriz: hormigón de 33, 54 y 71 MPa, y matriz UAD de 148 MPa |

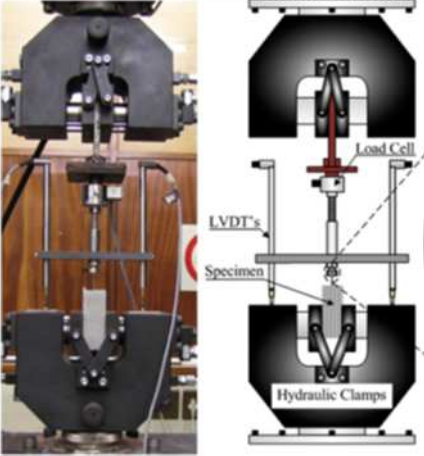
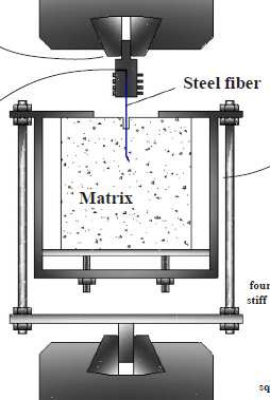
| | | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>(Nieuwoudt & Boshoff, 2017)</p> | <p>Fibras de acero con gancho de 60 mm y rectas (cortados los ganchos)</p> <p>Matriz: hormigón de 51 MPa</p> |
|  | <p>(Deng et al., 2018)</p> | <p>Fibras metálicas con gancho de 13 mm y rectas de 30 mm</p> <p>Matriz: hormigón de 40 y 50 MPa</p> |

Tabla 2-2. Diferentes configuraciones del ensayo de pullout de fibras: en la modalidad de “doble-sided test” con múltiples fibras.

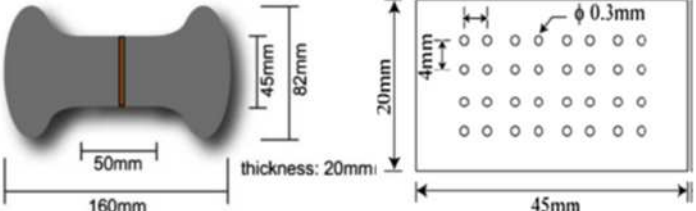
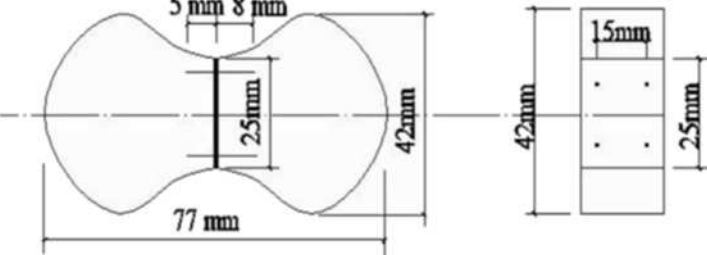

| Configuración del Ensayo | Referencia Bibliográfica | Observaciones |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | (Lee et al., 2010) | 32 fibras acero rectas de 13mm Matriz: UAD |
|  | (Wu et al., 2016) | 4 fibras de acero rectas de 13 mm Matriz: UAD (90-115 MPa) |
|  | (Simões et al., 2017) | Fibras de acero, con 2 tipos de gancho, de 35 y 60 mm Matriz: hormigón de 20, 60 y 100 MPa |
| Misma configuración de ensayo que (Wu et al., 2016) | (Wu, Shi, et al., 2018) | Fibras de acero rectas de 13 mm Matriz: UAD (90-115 MPa) |
| Misma configuración de ensayo que (Wu et al., 2016) | (Wu, Khayat, et al., 2018) | Fibras de acero de 3 tipos: rectas, con gancho y onduladas, todas de 13 mm. Matriz: UAD (con y sin fibras incorporadas) (90-115 MPa) |

Tabla 2-3. Síntesis de datos sobre el tipo de matriz utilizada

NOMENCLATURA:

FIBRAS:
Clasific. s/tamaño:
 mF: micro-fibra
 MF: macro-fibra
Material:
 M: metálicas
 PP: poliméricas

FIBRAS:
 D: diámetro de la fibra
 L: largo de la fibra
 L/D: relación de aspecto
 RT: resistencia a tracción
 E: Módulo de elasticidad

| Referencia | Fecha | FIBRAS | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------|------------|----------------------|
| | | tipo | forma | D (mm) | L (mm) | L/D - | RT (Mpa) | E (Gpa) | volumen fibra (%) |
| Y. Lee, S.T. Kang, J.K. Kim | 2010 | mF / M | rectas | 0,20 | 13 | 65 | 2500 | | |
| E. Zile, O. Zile | 2013 | MF / M | rectas | 0,75 | S.D. | S.D. | 1200 | | |
| | | MF / M | rectas | 1,00 | S.D. | S.D. | 1500 | | |
| | | MF / M | c/gancho | 0,75 | 50 | 67 | 1200 | | |
| | | MF / M | c/gancho | 1,00 | 60 | 60 | 1500 | | |
| | | MF / M | ondulada | 1,00 | 60 | 60 | 1500 | | |
| Alberti, Enfedaque, Gálvez, Ferreras | 2016 | MF / PP | rectas | 0,92 | 60 | 65 | 560 | >9 | |
| Wu, Shi, Khayat | 2016 | mF / M | rectas | 0,20 | 13 | 65 | 2800 | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| F.U.A. Shaikh, Y. Shafaei, P.K. Sarker | 2016 | MF / PP | ondulada | 0,85 | 65 | 75 | 250 | 3 | |
| | | MF / M | c/gancho | 0,90 | 60 | 65 | 1345 | 210 | |
| | | | | | | | | | |
| Simoes, Octavio, Valença, Costa, Dias-da-Costa, Júlio | 2017 | MF / M | c/gancho | 0,55 | 35 | 65 | 1345 | 200 | |
| | | MF / M | c/gancho | 0,90 | 60 | 65 | 2300 | 200 | |
| S. Abdallah, M. Fan, D.W.A. Rees | 2017 | MF / M | c/gancho | 0,90 | 60 | 65 | 1500 | 200 | |
| | | MF / M | c/gancho | 0,90 | 60 | 65 | 2300 | 200 | |
| P.D. Nieuwoudt, W.P. Boshoff | 2017 | MF / M | c/gancho | 0,90 | 60 | 67 | 1160 | 210 | |
| | | MF / M | rectas | 0,90 | S.D. | S.D. | 1160 | 210 | |
| Deng, Ding, Chi, Wang | 2018 | mF / PP | filamento | 0,03 | 15 | | 400 | 4 | (*) 0/0,05/0,1/0,15 |
| | | mF / M | rectas | 0,28 | 13 | | 3800 | 200 | (**) 0/0,5/1/1,5 |
| | | MF / M | c/gancho | 0,72 | 30 | 42 | 1100 | 120 | (**) 0/0,5/1/1,5 |
| Wu, Shi, Khayat | 2018 | mF / M | rectas | 0,20 | 13 | 65 | 2800 | | 2 |
| | | | | | | | | | 2 |
| | | | | | | | | | 2 |
| | | | | | | | | | 2 |
| | | | | | | | | | 2 |
| Wu, Khayat, Shi | 2018 | E66:AD68 | rectas | 0,20 | 13 | 65 | 2800 | | 2 |
| | | mF / M | c/gancho | 0,20 | 13 | 65 | 2800 | | 2 |
| | | mF / M | ondulada | 0,20 | 13 | 65 | 2800 | | 2 |

Tabla 2-4. Síntesis de datos sobre el tipo y características de las fibras utilizadas

NOMENCLATURA:

TIPO DE MATRIZ:
 UAD: ultra-alto desempeño
 H: hormigón
 M: mortero
 HAC: Hor. Auto-compactante
 ACCV: alto contenido de CV

ADICIONES:
 HS: humo de sílice
 FC: filler calcáreo
 CV: ceniza volante
 NS: nano sílice
 MS: micro sílice
 CM: cuarzo molido
 NC: nano-CaCO₃

ADITIVOS:
 SP:
 Superplastificante

AGREGADOS:
 F: arena fina
 G: arena gruesa
 MF: módulo de finura
 N: arena normalizada

| Referencia | Fecha | MATRIZ | | DOSIFICACION | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|-------|----------|----------|--------------|--------|-------------|---------|----------------|----------|----------------|----------|--------------------|--------------|------|------|-------------|------------|-----------------------|--------|------------|-------|
| | | | | Micro fibra | | Macro fibra | | cemento | | adición | | Mat. Cem. | AGUA | a/c | a/gl | aditivo | | Ag. Fino | | Ag. grueso | |
| | | tipo | fc (MPa) | tipo | kg/m3 | tipo | kg/m3 | fc (MPa) | kg/m3 | tipo | kg/m3 | kg/m3 | kg/m3 | | | tipo | kg/m3 | tipo | kg/m3 | tipo | kg/m3 |
| Y. Lee, S.T. Kang, J.K. Kim | 2010 | UAD | S.D. | | | | S.D. | 1 parte | HS + FC | 0,25/0,3 parte | | 0,25 parte | 0,25 | | SP | 0,018 parte | S.D. | 1,10 partes | | 0 | |
| E. Zile, O. Zile | 2013 | H | 39 | | | | S.D. | S.D. | S.D. | S.D. | | S.D. | 0,5 | | S.D. | S.D. | S.D. | S.D. | 8 mm | S.D. | |
| Alberti, Enfedaque, Gálvez, Ferreras | 2016 | HAC M | 39 | | | | | 375 1 parte | FC | 200 | 375 | 187,5 0,5 parte | 0,50 0,50 | 0,50 | SP | 4,7 | | 918 / 245 3 partes | | 367 | |
| Wu, Shi, Khayat | 2016 | HUAD | 90 | | | | 42,5 | 1079 | HS | 0 | 1079 | 177 | 0,16 | 0,16 | SP | 21,6 | MF 3.0 | 1079 | | 0 | |
| | | HUAD | 107 | | | | 42,5 | 971 | HS | 108 | 1079 | 177 | 0,18 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | | 0 | |
| | | HUAD | 105 | | | | 42,5 | 917 | HS | 162 | 1079 | 177 | 0,19 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | | 0 | |
| | | HUAD | 115 | | | | 42,5 | 863 | HS | 216 | 1079 | 177 | 0,21 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | | 0 | |
| | | HUAD | 112 | | | | 42,5 | 809 | HS | 270 | 1079 | 177 | 0,22 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | | 0 | |
| F.U.A. Shaikh, Y. Shafaei, P.K. Sarker | 2016 | M ACCV | 53 | | | | 1 parte | 100% | | 0% | | | | 0,40 | S.D. | | S.D. | 1 parte | | 0 | |
| | | M ACCV | 48 | | | | | 60% | CV | 40% | | | | 0,40 | S.D. | | S.D. | 1 parte | | 0 | |
| | | M ACCV | 34 | | | | | 50% | CV | 50% | | | | 0,40 | S.D. | | S.D. | 1 parte | | 0 | |
| | | M ACCV | 23 | | | | | 40% | CV | 60% | | | | 0,40 | S.D. | | S.D. | 1 parte | | 0 | |
| | | M ACCV | 41 | | | | | 60% | CV+NS | 38%-2% | | | | 0,40 | S.D. | | S.D. | 1 parte | | 0 | |
| | | M ACCV | 40 | | | | | 60% | CV+MS | 30%-10% | | | | 0,40 | S.D. | | S.D. | 1 parte | | 0 | |
| | | M ACCV | 47 | | | | | 60% | CV+NS+MS | 28%-2%-10% | | | | 0,40 | S.D. | | S.D. | 1 parte | | 0 | |
| Simoes, Octavio, Valença, Costa, Dias-da-Costa, Júlio | 2017 | M | 20 | | | | 32,5 | 366,5 | | 0 | 366,5 | 253,6 | 0,69 | 0,69 | SP | 0,92 | F: 0-1mm | F 341,5 / G 1148,8 | | 0 | |
| | | M | 60 | | | | 42,5 | 554,8 | | 0 | 554,8 | 229,8 | 0,41 | 0,41 | SP | 3,88 | MF 2,62 | F 191,8 / G 1257,7 | | 0 | |
| | | M | 100 | | | | 52,5 | 788,6 | | 0 | 788,6 | 204 | 0,26 | 0,26 | SP | 10,3 | G: 0-4mm | F 0 / G 1335,8 | | 0 | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | MF 3,53 | | | | |
| S. Abdallah, M. Fan, D.W.A. Rees | 2017 | H | 33 | | | | 32,5 | 364 | | 0 | 364 | 200 | 0,55 | 0,55 | | 0 | 0-4 mm | 812 | 6-8 mm | 979 | |
| | | H | 54 | | | | 52,5 | 350 | CV | 107 | 457 | 205 | 0,59 | 0,45 | | 0 | 0-4 mm | 1073 | 6-8 mm | 660 | |
| | | H | 71 | | | | 52,5 | 480 | CV | 45 | 525 | 210 | 0,44 | 0,40 | SP | 6 | 0-4 mm | 886 | 6-8 mm | 850 | |
| | | H UAD | 148 | | | | 52,5 | 710 | HS-CM | 230-210 | 1150 | 127 | 0,18 | 0,11 | SP | 60,7 | 150-600 µm | 1020 | | 0 | |
| P.D. Nieuwoudt, W.P. Boshoff | 2017 | H | 51 | | | | 52,5 | 395 | | 0 | 395 | 190 | 0,48 | 0,48 | SP | 2,0 | MF 2,3 | 990 | 6 mm | 800 | |
| Deng, Ding, Chi, Wang | 2018 | H | 40 | PP/M | */** | M | ** | 42,5 | 360 | | 0 | 360 | 176 | 0,49 | 0,49 | SP | 2,8 | MF 2,7 | 642 | 5-20mm | 1192 |
| | | H | 50 | PP/M | */** | M | ** | 42,5 | 438 | | 0 | 438 | 176 | 0,40 | 0,40 | SP | 4,4 | MF 2,7 | 574 | 5-20mm | 1190 |
| Wu, Shi, Khayat | 2018 | HUAD | 103 | M | 0 ó 2% | | | 42,5 | 863 | HS + NC | 216/0 | 1079 | 177 | 0,21 | 0,16 | SP | 21,6 | MF 3.0 | 1079 | 0 | |
| | | HUAD | 112 | M | 0 ó 2% | | | 42,5 | 846 | HS + NC | 216/17,3 | 1079 | 177 | 0,21 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | 0 | |
| | | HUAD | 114 | M | 0 ó 2% | | | 42,5 | 829 | HS + NC | 216/34,5 | 1080 | 177 | 0,21 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | 0 | |
| | | HUAD | 115 | M | 0 ó 2% | | | 42,5 | 811 | HS + NC | 216/51,8 | 1079 | 177 | 0,22 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | 0 | |
| | | HUAD | 97 | M | 0 ó 2% | | | 42,5 | 794 | HS + NC | 216/69,1 | 1079 | 177 | 0,22 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | 0 | |
| Wu, Khayat, Shi | 2018 | HUAD | 105 | M | 0 | | | 42,5 | 917 | HS | 162 | 1079 | 177 | 0,19 | 0,16 | SP | 21,6 | MF 3,0 | 1079 | 0 | |
| | | HUAD | 115 | M | 0 | | | 42,5 | 863 | HS | 216 | 1079 | 177 | 0,21 | 0,16 | SP | 21,6 | | 1079 | 0 | |
| | | HUAD | S.D. | M | 156 | | | 42,5 | 863 | HS | 216 | 1079 | 166 | 0,19 | 0,15 | SP | 43,2 | | 923 | 0 | |

Tabla 2-5. Síntesis de datos sobre el tipo de ensayos realizados sobre la matriz y la interfaz F-M

NOMENCLATURA:

| | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ENSAYOS MATRIZ: Flz: Fluidez RC: resistencia a compresión E: módulo de elasticidad RT: resistencia a tracción por compr. por diametral FL: flexión</p> | <p>OTROS ENSAYOS: MIP: Mercury intrusion porosimetry MEB: microscop. Electr. Barrido TG: Thermo-gravimetry AT: altas temperaturas MO: microscopía óptica MD: micro-dureza</p> | <p>ENSAYO PULLOUT: Configuración: Forma Probeta: DST: doble-side te; D-B: "Dog-bone" SST: single-sided te; P: prismática Cantidad fibras: C: cilíndrica MF: multiple fibers SF: single fiber</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| Referencia | Fecha | ENSAYOS | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|-------|---------|----------------|-------------|----------------|----|------------------|--------------|-----|------------------------------------|-----------------------------|----|
| | | MATRIZ | | | | | | FIBRA-MATRIZ | | | | |
| | | Flz | R _C | E | R _T | FL | OTROS | pullout | MEB | OTROS | | |
| Y. Lee, S.T. Kang, J.K. Kim | 2010 | | X | | | | | | | DST / MF D-B | | |
| E. Zile, O. Zile | 2013 | | X | | | | | | | SST / SF P | | |
| Alberti, Enfedaque, Gálvez, Ferreras | 2016 | | X | | | | | | | SST / SF P / C | x100 / x250 x500 / x1000 | |
| Wu, Shi, Khayat | 2016 | | X | | | X | MIP SEM TG | | | DST / MF D-B | x250 | MD |
| F.U.A. Shaikh, Y. Shafaei, P.K. Sarker | 2016 | X | X | | | | MIP | | | SST / SF P | | |
| Simoës, Octavio, Valença, Costa, Dias-da-Costa, Júlio | 2017 | | X X X | X X X | | | | | | DST / MF P | | |
| S. Abdallah, M. Fan, D.W.A. Rees | 2017 | | X | | | | AT | | | SST / SF P | | |
| P.D. Nieuwoudt, W.P. Boshoff | 2017 | X | X | | | | | | | SST / SF / P carga sostenida | | |
| Deng, Ding, Chi, Wang | 2018 | | X X | | X X | | | | | SST / SF P | | |
| Wu, Shi, Khayat | 2018 | X | X | | | X | MIP SEM MO | | | DST / MF D-B | x250 | MD |
| Wu, Khayat, Shi | 2018 | X | X | | | X | MIP SEM TG | | | DST / MF D-B | x250 | |

2.4 Recomendaciones y normas de referencia en HRF a nivel internacional.

A continuación, se presentan las principales normas identificadas, procedimientos o documentos de referencia en el tema de hormigón reforzado con fibras, el tipo y características de las fibras que pueden utilizarse y al ensayo de pullout.

Publicaciones y normas de referencia en el tema Hormigones Reforzados con Fibras:

- (ACI Committee 544, 1996): ACI Committee 544. (1996). *544.1R-96: Report on Fiber Reinforced Concrete (Reapproved 2009)*. American Concrete Institute
- (International Federation for Structural Concrete (fib), 2010): International Federation for Structural Concrete (fib). (2013). *Fib Model Code for Concrete Structures 2010* (Ernst & Sohn (ed.); 1st ed.).
- (Ministerio de Fomento, 2011): Ministerio de Fomento. (2011). *Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08*. (Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica (ed.); 5th ed.).
- UNE-EN 14651:2007+A1:2008 - Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)
- ASTM C1609 / C1609M – 19a - Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)

Normas relativas a las fibras a ser empleadas en hormigón:

- UNE-EN 14889-1:2008 - Fibras para Hormigón. Parte 1. Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad
- UNE-EN 14889-2:2008 - Fibras para hormigón. Parte 2. Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad
- ASTM A820 / A820M – 16 Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete
- UNI 11037 - Fibras de acero a ser empleadas en la preparación de conglomerado de cemento reforzado

Normas que hacen referencia a ensayos realizados con probetas con forma identificada como “Dog-bone” (o “brinquette”), cuyo ensayo fue adaptado para el ensayo de pullout de fibras:

- AASHTO T132, “Standard Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars,” In American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Washington, DC, 2000
- ASTM C307-18 Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing
- Chinese national standard, The Test Method for Property of Bond Between Steel Fiber and Mortar, China, Beijing, 2009. CECS13-2009. 64-68. Norma usada en los trabajos de (Wu et al., 2016; Wu, Shi, et al., 2018)

Capítulo 3 – INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se establece la metodología seguida en el desarrollo experimental de la investigación, se indican los materiales empleados y su caracterización, así como los métodos y técnicas utilizadas, y por último las características del análisis estadístico realizado.

3.1 METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología adoptada para alcanzar los objetivos de la Tesis, relativo al análisis de los mecanismos de unión de la interfaz fibra-matriz (F-M) en compuestos de matriz cementícea reforzados con fibras metálicas, se utilizó:

- una **matriz de microhormigón** (elaborado sin agregado grueso) considerando como variables, por una parte, dos relaciones agua/aglomerante y dos relaciones arena/cemento (correspondientes a un microhormigón de resistencia normal y un microhormigón de alto desempeño) y por otra parte, la incorporación de tres volúmenes (0,05%, 0,10% y 0,15%) de **microfibras poliméricas** según cantidades utilizadas por (Deng et al., 2018).
- **macrofibras metálicas** con gancho y fibras rectas, éstas últimas obtenidas de cortar el gancho en uno de los extremos (Zile & Zile, 2013; Nieuwoudt & Boshoff, 2017; Simões et al., 2017), de manera de poder evaluar el comportamiento de la misma fibra sin el anclaje mecánico.

El análisis de la interfaz F-M se abordó a través de dos escalas:

- por una parte, a **escala macroestructural**, mediante la evaluación del comportamiento mecánico de ambos tipos de fibras (recta y con gancho) a través del ensayo de pullout, que consiste en el arrancamiento de la/s fibra/s metálica/s de la matriz cementícea, se pueden identificar tres tipos de modo de falla: estallido de la matriz, rotura de la fibra, falla de la interfaz F-M. A través del análisis de la relación entre la carga de pullout vs. el desplazamiento de la fibra, se pueden analizar los diferentes mecanismos de unión de la interfaz F-M (adherencia química, fricción, anclaje mecánico) a ser desarrollados en la sección 3.3.2.1 parte C. En base a la revisión de artículos científicos realizada y teniendo en cuenta los medios y equipamientos disponibles en laboratorio, para la realización del ensayo pullout se adoptaron dos configuraciones diferentes:
 - dispositivo D1: “single-sided test” con una fibra según configuración empleada por (Alberti et al., 2016; Deng et al., 2018) y,
 - dispositivo D2: “doble-sided test” con un conjunto de 16 fibras según configuración empleada por (Simões et al., 2017).
- por otra parte, a **escala microestructural**, se tomaron muestras de las probetas ensayadas por pullout (matriz y fibras rectas) y se analizó la microestructura de la interfaz F-M, mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) equipado con un detector de rayos X de energía dispersa (EDS).

A continuación, en la sección 3.2 se presentan en detalle los materiales empleados, mientras que en la sección 3.3 los ensayos o técnicas empleadas durante la campaña experimental. Por último, en la sección 3.4 se indican las características del análisis estadístico realizado.

3.2 MATERIALES

En cuanto a la **matriz cementícea** empleada en la campaña experimental, se seleccionaron dos mezclas de microhormigón según las dosificaciones empleadas por (Rodríguez de Sensale et al., 2012) indicadas en la Tabla 3-1. Las dosificaciones seleccionadas corresponden a un microhormigón (MH) con una resistencia a la compresión normal empleado comúnmente para premoldeados en nuestro país, con relación agua/aglomerante de 0,50 y relación arena/cemento de 3:1; y, por otro lado, a un microhormigón de alto desempeño (MHAD) con relación agua/aglomerante de 0,36 y relación arena/cemento de 2:1, dichas mezclas fueron identificadas en la campaña experimental de la Tesis como MH1 y MH2 respectivamente. Además, se incorporaron diferentes contenidos de microfibras de polipropileno (0; 0,05%; 0,10%; 0,15% (Deng et al., 2018) expresados en porcentaje del volumen de la matriz cementícea). En la Tabla 3-2, se indican las dosificaciones y nomenclatura utilizada durante la campaña experimental.

Tabla 3-1. Microhormigón empleado en Rodríguez de Sensale et al. (2012)

| Microhormigón | a/agl | arena/CP |
|-------------------|-------|----------|
| MH - pobre | 0,60 | 3,5 |
| MH - medio-pobre | 0,50 | 3,0 |
| MHAD - medio | 0,42 | 2,5 |
| MHAD - medio-rico | 0,36 | 2,0 |
| MHAD - rico | 0,30 | 1,5 |

Nota: La denominación utilizada por los autores de “pobre”, “medio-pobre”, “medio”, “medio-rico” y “rico” refiere al contenido de cemento portland que incorporan.

Tabla 3-2. Dosificaciones de microhormigón empleadas en la campaña experimental

| Código | a/agl | arena/CP | Aditivo (%) | Microfibra (%) |
|--------|-------|----------|-------------|----------------|
| MH1/0 | 0,50 | 3,0 | 0,20 | 0 |
| MH1/5 | | | | 0,05 |
| MH1/10 | | | 0,22 | 0,10 |
| MH1/15 | | | | 0,15 |
| MH2/0 | 0,36 | 2,0 | 0,70 | 0 |
| MH2/5 | | | | 0,05 |
| MH2/10 | | | 0,78 | 0,10 |
| MH2/15 | | | | 0,15 |

Nota: El aditivo está expresado en porcentaje respecto al peso del cemento.

La nomenclatura utilizada para la identificación de las mezclas y especímenes de ensayo hace referencia al tipo de microhormigón (MH1 y MH2), al contenido de microfibra polimérica (0%, 0,05%, 0,10%, 0,15%), por último, para el ensayo de pullout al usar macrofibra de acero con

gancho o fibra recta se añadió una (G) o una (R) respectivamente. Por lo cual, por ejemplo, el espécimen identificado como “MH1/15/G” corresponde a un microhormigón con una relación a/agl de 0,50 y relación arena/cemento de 3:1, con un contenido de 0,15% de microfibra polimérica y con macrofibra de acero con gancho empleada para el ensayo de pullout.

Para la elaboración de microhormigón se empleó una mezcla de dos agregados finos (arena fina y gruesa), un cemento portland compuesto CPC40, agua destilada, aditivo superplastificante, microfibras poliméricas y macrofibras de acero. La Tabla 3-3 resume los ensayos y métodos utilizados para la caracterización de los materiales.

Tabla 3-3. Resumen de ensayos y métodos empleados para la caracterización de materiales

| Material | Análisis | Método o Norma de referencia, y Laboratorio |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cemento | Composición química por Fluorescencia de Rayos X (FRX) | Dpto. Ingeniería de Materiales y Minas del Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería (UdelaR) |
| | Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) equipado con un detector de rayos X de energía dispersa (EDS) | Unidad de Microscopía Electrónica de Barrido, Facultad de Ciencias (UdelaR) |
| | Densidad absoluta | UNIT-NM 23:2004 (*) |
| | Finura: Superficie Específica Blaine | UNIT-NM 76:1998 (*) |
| | Pasta de Consistencia Normal | UNIT-NM 43:2004 (*) |
| | Tiempo de fraguado | UNIT-NM 65:2004 (*) |
| | Constancia de volumen: Expansión en Autocalve | UNIT 514:2019 (*) |
| | Resistencia a flexión y compresión | UNIT-ISO 679:2009 (*) |
| Agregado fino (arenas) | Densidad relativa y aparente | UNIT-NM 52:2009 (*) |
| | Absorción | UNIT-NM 30:2002 (*) |
| | Determinación de impurezas orgánicas | UNIT-NM 49:2002 (*) |
| | Granulometría y módulo de finura | UNIT-NM 248:2002 (*) |
| Aditivo | Cono de Marsh (compatibilidad aditivo-cemento y punto de saturación del aditivo) | Método empleado por (AITCIN, 1998) (*) |
| Macrofibras de acero | Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) equipado con un detector de rayos X de energía dispersa (EDS) | Unidad de Microscopía Electrónica de Barrido, Facultad de Ciencias (UdelaR) (**) |
| Microfibras poliméricas | Datos suministrados por el fabricante | |

Notas:

(*) ensayos realizados por la tesista en el Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad Ingeniería (UdelaR);

(**) ensayos realizados por la tesista en la Unidad de M.E.B.

A continuación, se expone la selección y caracterización de los materiales utilizados en la campaña experimental y/o datos suministrados por fabricantes, según corresponda.

3.2.1 Cemento Pórtland

Se utilizó el cemento portland compuesto (CPC40) fabricado por la empresa Cementos Artigas, suministrado a granel. El cemento es obtenido, según datos del fabricante, por la molienda conjunta de Clinker Pórtland y pequeñas cantidades de yeso, filler calcáreo, escoria granulada de alto horno y aditivos mejoradores de molienda y calidad.

Se determinó la composición elemental porcentual en peso (en base seca) empleando espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil, realizada en el Dpto. Ingeniería de Materiales y Minas del Instituto de Ingeniería Química (Facultad de Ingeniería, UdelaR). En la Tabla 3-4 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3-4. Composición química del CPC40

| Analito | (%) (*) | Analito | (%) (*) |
|--------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| SiO ₂ | 13,8 | SO ₃ | 7,8 |
| Al ₂ O ₃ | 2,8 | P ₂ O ₅ | <0,1 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,3 | Cl | 0,03 |
| MnO | 0,05 | Ti | <0,2 |
| MgO | 2,4 | Cu | <0,005 |
| CaO | 58,5 | Zn | <0,02 |
| Na ₂ O | S.D. | Pb | <0,002 |
| K ₂ O | 1,6 | Pérdida por calcinación | 5,51 |

Nota (*): el equipo cuantifica los elementos con número atómico mayor o igual a 12, por lo que no determina Na, O y C, entre otros. (S.D. – Sin datos)

Por otra parte, se tomaron imágenes MEB del cemento Pórtland en polvo con distintos aumentos (Figura 3-1).

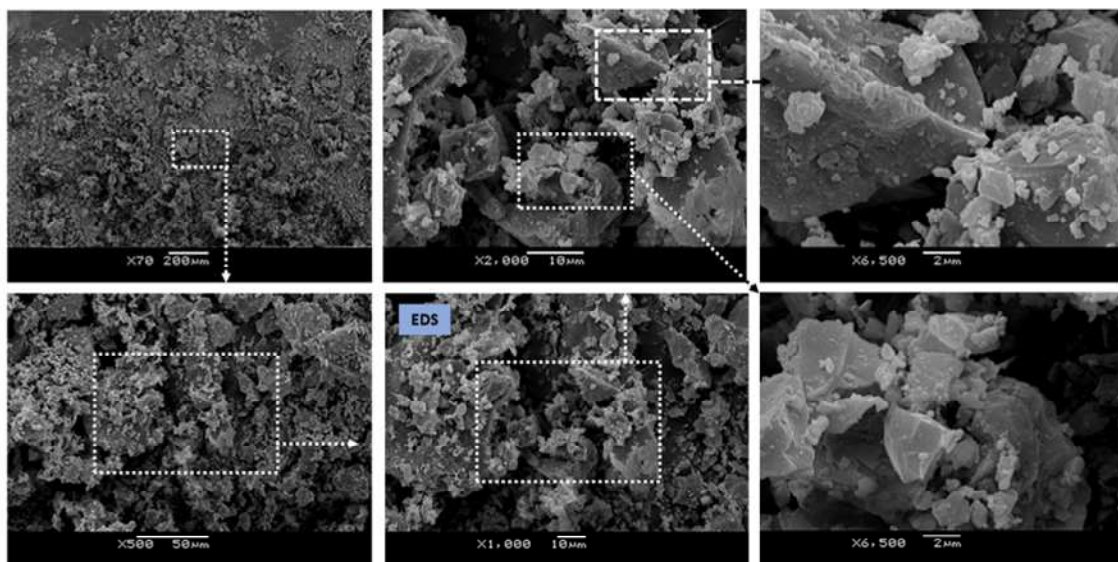


Figura 3-1. Imágenes MEB del Cemento Pórtland en polvo

En la Tabla 3-5 se indican los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros físicos del cemento: densidad absoluta (UNIT-NM 23:2004), superficie específica Blaine (UNIT-NM 76:1998), consistencia normal (UNIT-NM 43:2004), constancia de volumen mediante expansión en Autoclave (UNIT 514:2019), tiempo de fraguado (UNIT-NM 65:2004). Por último, en la Tabla 3-6 se indican los resultados obtenidos relativos a resistencia a flexión y a compresión a los 2 y 28 días de edad del cemento (UNIT-ISO 679:2009).

Tabla 3-5. Propiedades físicas del CPC40

| Propiedad | Valor |
|---------------------------------------|---------|
| Densidad (g/cm ³) | 3,077 |
| Finura Blaine (cm ² /g) | 3748 |
| Consistencia normal (%) | 29,4 |
| Constancia de volumen (%) | 0,061 |
| Tiempo de fraguado inicial (hora min) | 3 h 25´ |
| Tiempo de fraguado final (hora min) | 4 h 15´ |

Tabla 3-6. Propiedades Mecánicas del CPC40

| Propiedad | 2 días | 28 días |
|--------------------------------|--------|---------|
| Resistencia a Flexión (MPa) | 5,0 | 8,0 |
| Resistencia a Compresión (MPa) | 25,8 | 43,9 |

En base a los resultados presentados, el cemento Pórtland empleado cumple con los requisitos establecidos por la norma UNIT 20:2017 para su uso en hormigón, según lo exige la norma UNIT 1050:2005.

3.2.2 Agregado Fino

Se utilizó una mezcla de arenas naturales, compuesta por una arena fina y una arena gruesa con módulos de finura de 1,27 y 3,40 respectivamente (UNIT-NM 248:2002). En la Tabla 3-7 se indican la densidad, el peso específico y la absorción de los agregados finos. En la Figura 3-2 están graficadas las granulometrías de la arena fina y gruesa utilizadas, determinadas de acuerdo a la norma UNIT-NM 248:2002. Se puede observar que la granulometría de la arena gruesa es apta para la elaboración de hormigón, de acuerdo a los límites que establece la norma UNIT 82:1951, y se considera como una arena Clase I que corresponde a un “agregado fino recomendable para hormigones”. Si bien la granulometría de la arena fina ensayada no cumple con dichos parámetros, se analizaron combinaciones de arena fina:gruesa correspondientes a 10:90, 20:80, 30:70 y 40:60, observándose que las tres primeras cumplen con los límites de la Clase I, mientras que la mezcla 40:60 corresponde a una arena Clase II relativa a un “agregado fino aceptable para hormigón”. El módulo de finura para las combinaciones de arena fina:gruesa de 10:90, 20:80 y 30:70 es 3,18, 2,97 y 2,76 respectivamente.

Tabla 3-7. Densidad, peso específico y absorción de los agregados finos

| Propiedad | Arena Fina | Arena Gruesa |
|--------------------------------------|------------|--------------|
| Densidad (Kg/m ³) | 1360 | 1340 |
| Peso Específico (g/cm ³) | 2,6 | 2,6 |
| Absorción (%) | 0,6 | 0,6 |

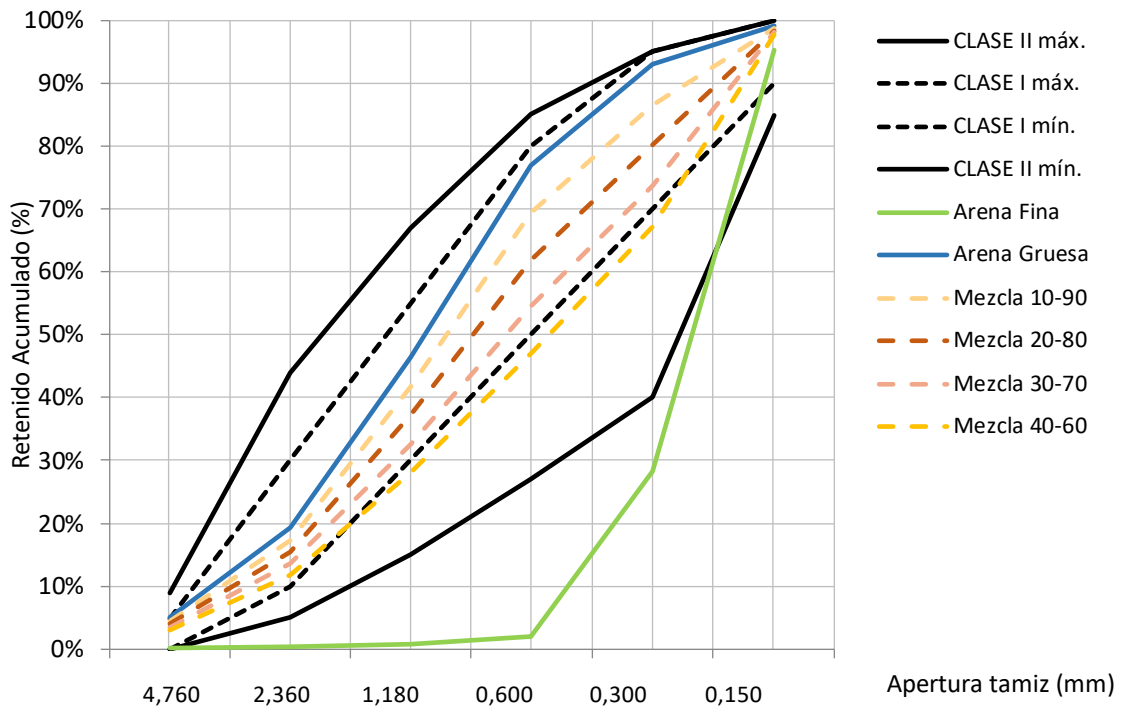


Figura 3-2. Curva granulométrica de los agregados finos

En forma complementaria, se realizó el ensayo para la determinación de impurezas orgánicas (UNIT-NM 49:2002). En la Figura 3-3b se presenta la muestra de arena preparada con la solución de hidróxido de sodio, y puede observarse que presenta un color más claro que la solución patrón de ácido tánico (Figura 3-3a). Por lo cual, el agregado fino cumple con el requisito establecido en la norma UNIT 1050:2005, en cuanto a la proporción de materia orgánica.

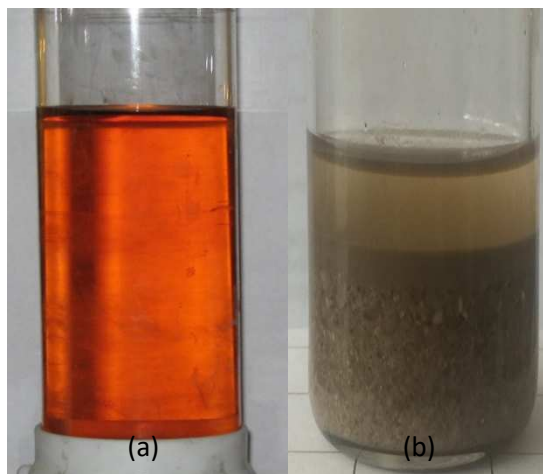


Figura 3-3. Ensayo de presencia de Impurezas orgánicas: (a) solución patrón de ácido tánico; (b) muestra de arena preparada con hidróxido de sodio.

En base a los resultados obtenidos, se optó por utilizar la mezcla de arenas fina:gruesa correspondiente a 10:90 ya que esa combinación presenta mejores resultados en cuanto a:

- Fluidez: se realizó el ensayo de consistencia (IRAM 1570) observándose que la mezcla de arena fina:gruesa en proporción 10:90 presentó los mayores diámetros de escurrimiento,
- Módulo de Finura (MF) de la arena: el MF de la combinación 10:90 es 3,18 muy próximo al de la arena gruesa, y en base a los resultados obtenidos en la Tesis de Maestría de (Gargano,

2020) se pudo concluir que para microhormigón de alto desempeño es conveniente utilizar arenas gruesas con valores altos de MF, que presenten gráficas de distribución granulométricas regulares ubicadas dentro de los límites recomendables y aceptables para hormigón según UNIT 82:1951,

- Distribución granulométrica: si bien la curva granulométrica de la arena gruesa es tipo Clase I, la curva de la combinación de arenas 10:90 tiene una distribución más regular y equilibrada en relación al límite superior de la Clase I para el agregado fino recomendable para su uso en hormigón.

3.2.3 Agua

Se utilizó agua destilada.

3.2.4 Aditivo

Se utilizó aditivo ViscoCrete 6, un hiperfluidificante de alto rendimiento, en base a una solución acuosa de polycarboxilatos modificados, con una densidad de 1,08 kg/l y 35% de sólidos (datos suministrados por el fabricante). La dosificación recomendada según el fabricante es de 0,2 a 1,1 % del peso del cemento.

A través del ensayo de Cono de Marsh (AITCIN, 1998) se evaluó la compatibilidad entre aditivo-cemento (Viscocrete 6 – CPC40 Artigas), y se determinó el punto de saturación del aditivo. Se prepararon varias pastas con distintos porcentajes de aditivo, y en cada instancia se determinaron los tiempos de fluidez de las pastas a los 5 y 60 minutos. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3-4. Se puede observar que hay compatibilidad entre el aditivo y el cemento, y además el punto de saturación del aditivo es 0,80%.

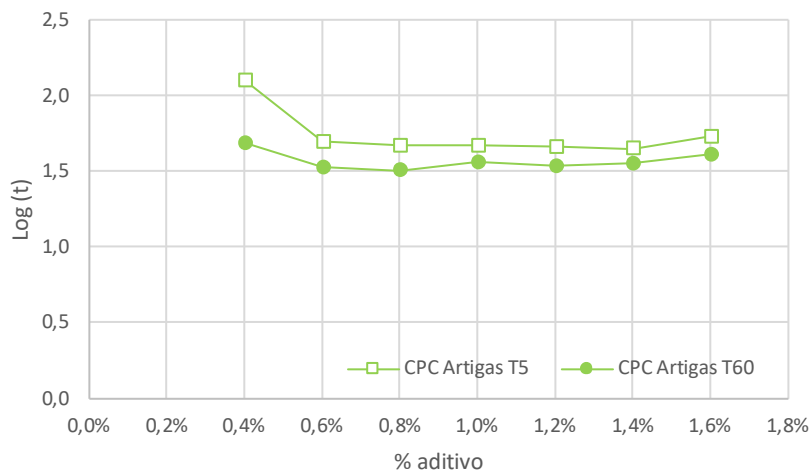


Figura 3-4. Resultados del ensayo del Cono de Marsh

3.2.5 Macrofibras de acero

Se utilizaron macrofibras de acero con gancho cuyo nombre comercial es WIRAND FF1, fabricadas por Macafferri. Según datos suministrados por el fabricante, las fibras son producidas a partir de alambre de acero de bajo contenido de carbono, trefilado a frío (Figura 3-5), cuyas características técnicas están indicadas en la Tabla 3-8.

Se utilizan dichas fibras dado que, de las fibras disponibles en el mercado, son las que presentan mayor diámetro y longitud (para facilitar el ensayo de pullout), y además tienen características similares a las empleadas en los trabajos científicos analizados (Abdallah et al., 2017; Alberti et al., 2016; Nieuwoudt & Boshoff, 2017; Shaikh et al., 2016; Simões et al., 2017; Zile & Zile, 2013). Para el caso del ensayo de fibras rectas, se cortó cuidadosamente el gancho de uno de los extremos de las fibras, de manera de poder evaluar el comportamiento de la misma fibra sin la influencia que ofrece el anclaje mecánico ejercido por el gancho.



Figura 3-5. Macrofibras de acero WIRAND FF1

Tabla 3-8. Datos técnicos de macrofibras de acero WIRAND FF1

Propiedades Físicas:

| | |
|-------------------------------|-----|
| Diámetro (mm) | 1,0 |
| Largo (mm) | 50 |
| Relación L/d (largo/diámetro) | 50 |

Propiedades Mecánicas:

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Resistencia a la tracción (MPa) | >1100 |
| Módulo elástico (MPa) | 2.100.000 |
| Deformación en la ruptura (%) | <4 |

Complementariamente, se tomaron imágenes con el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de la superficie de la fibra de acero en su estado original con diferentes aumentos, para poder compararlas con la superficie de las fibras extraídas por pullout. En las Figuras 3-6 y 3-7 se observan las imágenes de tres Fibras Control diferentes, donde puede apreciarse que la superficie del acero presenta zonas con diferentes topografías: surcos, irregularidades, sectores más uniformes.

Además, mediante el detector de rayos X de energía dispersa (EDS) del Microscopio, se identificaron los elementos químicos presentes en la superficie de las fibras de acero. Para lo cual se seleccionaron determinados puntos de interés en las imágenes MEB tomadas de un sector de las fibras control N°1 y N°2 y se cuantificó la intensidad de los elementos químicos allí presentes, expresados según su peso (%) y según el peso atómico (%). En la Figura 3-8 se muestran los puntos seleccionados de dos zonas que se reconocen en las imágenes MEB: zonas más claras que se corresponden con las partes que se encuentran más arriba en la topología de la superficie analizada, y en las zonas más oscuras que corresponde con las partes que se encuentran más abajo. En la Tabla 3-9 se presentan los resultados del análisis mediante EDS de los puntos seleccionados de ambos sectores y, a continuación, se presentan los valores

promedio de los diferentes elementos químicos identificados para cada una de las dos zonas (gris claro y gris oscuro). En base a ello puede observarse, por un lado, que en la “zona clara” predomina la presencia de hierro (Fe), mientras que en la “zona oscura” prevalece el carbono (C), oxígeno (O) y hierro (Fe). Por otro lado, se detectan pequeñas cantidades de titanio en la composición del acero, ya que la función del titanio es "atrapar" moléculas de carbono y nitrógeno, responsables del envejecimiento del acero, y las hace más estables sin afectar las propiedades del material.

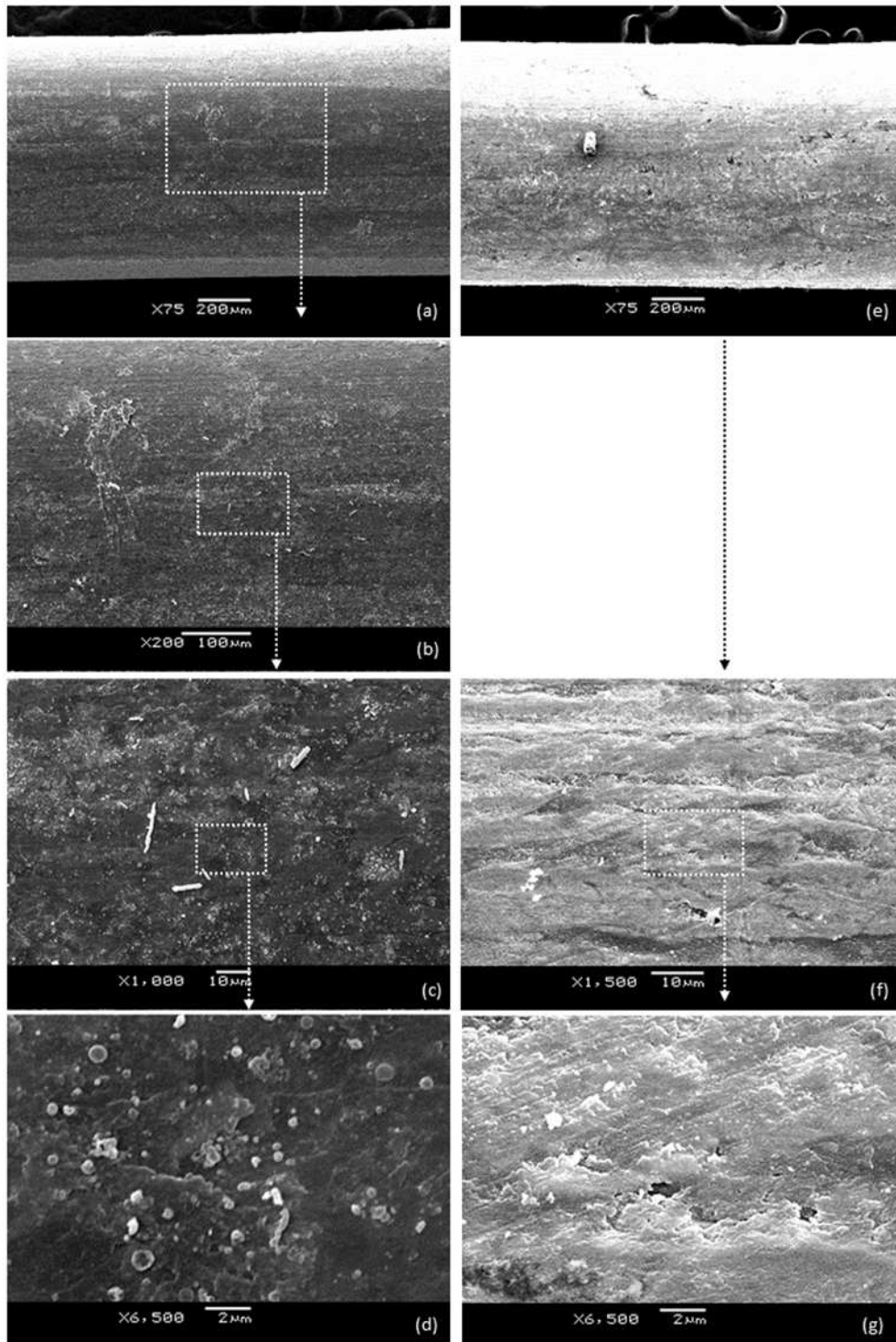


Figura 3-6. Imágenes MEB de las Fibras Control N°1 (a, b, c, d) y N°2 (e, f, g)

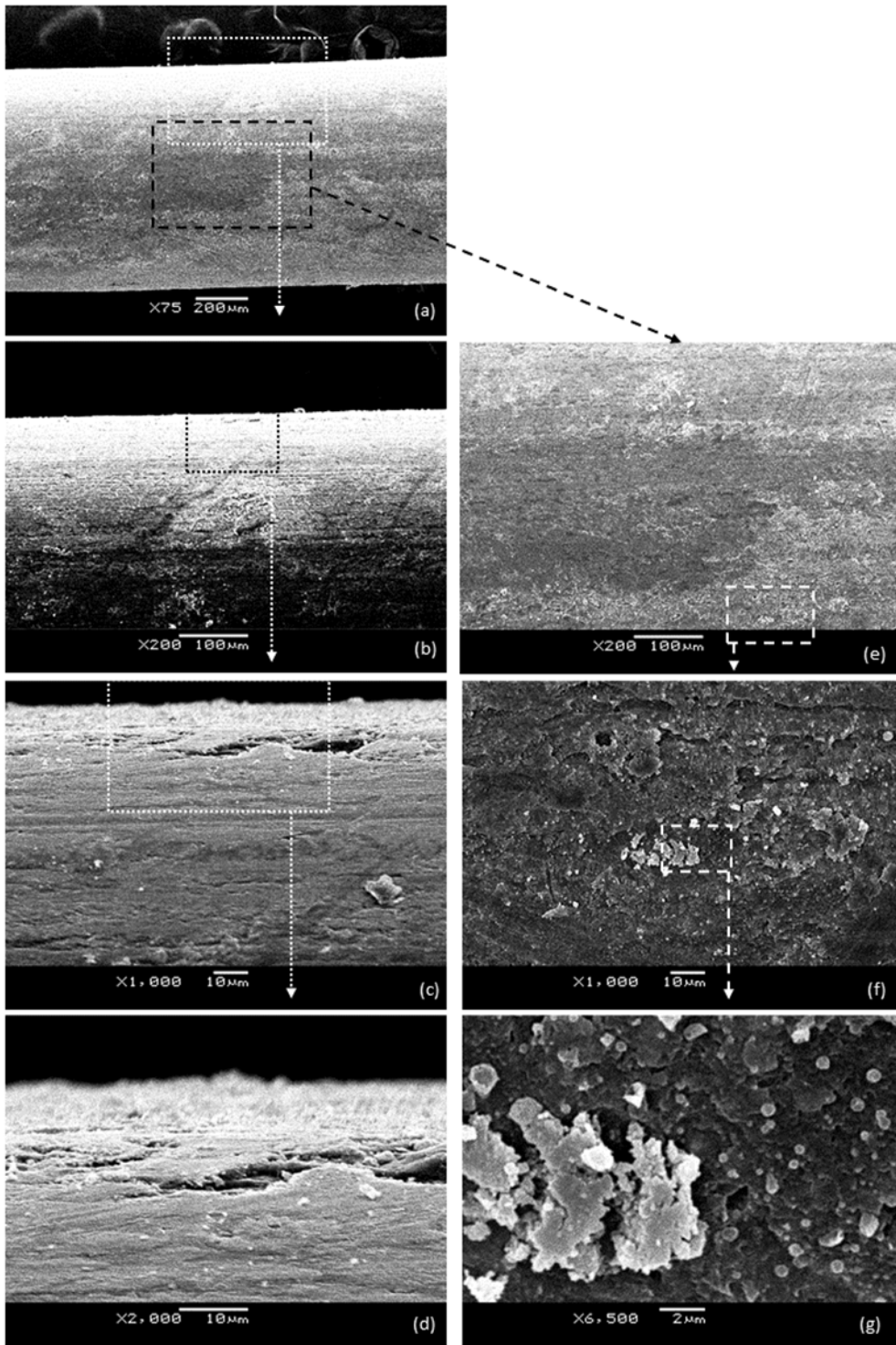


Figura 3-7. Imágenes MEB de la Fibra Control N°3

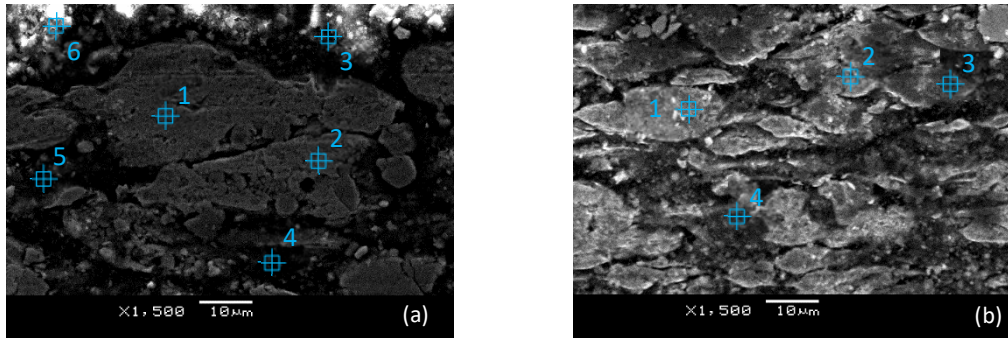


Figura 3-8. Puntos analizados mediante EDS en las imágenes MEB de las fibras de acero N°1 (a) y N°2 (b)

Tabla 3-9. Resultados del análisis mediante EDS de la fibra de acero N°1 (F1) y Fibra N°2 (F2)

| | | C-K | O-K | Na-K | Si-K | Ca-K | Ti-K | Mn-K | Fe-K |
|------|---------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| F1-1 | Peso (%) | 5,485 | | | | | | | 94,515 |
| | Peso Atom (%) | 21,248 | | | | | | | 78,752 |
| F1-2 | Peso (%) | 2,225 | 7,063 | | | 1,202 | | | 89,509 |
| | Peso Atom (%) | 8,200 | 19,537 | | | 1,328 | | | 70,935 |
| F1-3 | Peso (%) | 25,979 | 45,188 | 2,144 | | 10,966 | 1,420 | | 14,303 |
| | Peso Atom (%) | 38,351 | 50,078 | 1,654 | | 4,851 | 0,526 | | 4,541 |
| F1-4 | Peso (%) | 23,675 | 33,911 | 2,304 | 0,932 | 10,239 | 1,350 | | 27,589 |
| | Peso Atom (%) | 39,409 | 42,376 | 2,004 | 0,663 | 5,108 | 0,563 | | 9,877 |
| F1-5 | Peso (%) | 23,032 | 38,442 | 2,652 | | 12,443 | 2,274 | | 21,158 |
| | Peso Atom (%) | 37,073 | 46,452 | 2,230 | | 6,002 | 0,918 | | 7,324 |
| F1-6 | Peso (%) | 19,431 | 34,100 | 1,936 | | 12,082 | 1,501 | | 30,950 |
| | Peso Atom (%) | 34,272 | 45,153 | 1,784 | | 6,386 | 0,664 | | 11,741 |
| F2-1 | Peso (%) | 2,364 | 3,079 | | | 1,127 | | | 93,429 |
| | Peso Atom (%) | 9,417 | 9,207 | | | 1,346 | | | 80,031 |
| F2-2 | Peso (%) | 16,620 | 9,823 | 0,620 | | 1,755 | 0,389 | 0,373 | 70,421 |
| | Peso Atom (%) | 41,376 | 18,358 | 0,806 | | 1,310 | 0,243 | 0,203 | 37,705 |
| F2-3 | Peso (%) | 9,664 | 9,917 | 2,377 | 0,487 | 7,244 | | | 70,311 |
| | Peso Atom (%) | 26,955 | 20,765 | 3,464 | 0,581 | 6,055 | | | 42,179 |
| F2-4 | Peso (%) | 21,704 | 19,612 | 2,065 | | 7,643 | 1,889 | | 47,088 |
| | Peso Atom (%) | 43,066 | 29,214 | 2,141 | | 4,545 | 0,940 | | 20,095 |

Promedio Peso (%):

| | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----|-----|-------------|-----|-----|-------------|
| Zona clara | 7,3 | 7,5 | 1,5 | 0,5 | 2,8 | 0,4 | 0,4 | 83,6 |
| Zona oscura | 22,8 | 34,3 | 2,2 | 0,9 | 10,7 | 1,7 | 0,0 | 28,2 |

Promedio Peso Atom.(%):

| | | | | | | | | |
|-------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Zona clara | 8,2 | 9,2 | 0,8 | 0,6 | 1,3 | 0,2 | 0,2 | 37,7 |
| Zona oscura | 34,3 | 29,2 | 1,7 | 0,7 | 4,5 | 0,5 | 0,0 | 4,5 |

3.2.6 Microfibras poliméricas

Se utilizaron microfibras poliméricas FibroMac® 12 fabricadas por Macafferri, la cual es una fibra de polipropileno de sección circular producida a partir de multifilamentos (Figura 3-9). Las características técnicas están indicadas en la Tabla 3-10, los datos fueron suministrados por el fabricante.



Figura 3-9. Microfibras poliméricas FibroMac® 12

Tabla 3-10. Datos técnicos de las microfibras poliméricas FibroMac® 12

| Propiedades Físicas: | |
|--------------------------------------------------------|------|
| Diámetro (μm) | 18 |
| Largo (mm) | 12 |
| Peso específico (g/cm^3) | 0,91 |
| Área superficial específica (m^2/kg) | 225 |
| Propiedades Mecánicas: | |
| Temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$) | 160 |
| Resistencia a la tracción (MPa) | 300 |
| Módulo de Young (MPa) | 3000 |

3.3 MÉTODOS

En cuanto a la matriz cementícea se determinó la consistencia en estado fresco, la resistencia mecánica a flexión y compresión en estado endurecido a los 28 días de edad.

Por otro parte, se analizó la interfaz F-M a dos escalas. A escala macroestructural, se realizaron ensayos de pullout de una fibra aislada y de un grupo de 16 fibras, en ambos casos se utilizaron fibras rectas y con gancho. A escala microestructural, se realizó el análisis de imágenes por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) del surco dejado por la fibra una vez arrancada, de la superficie de la fibra, y de la zona de transición (ZdeT) entre F-M.

La Tabla 3-11 resume los métodos utilizados para el análisis de la interfaz F-M, la matriz cementícea y fibras de acero; y en las secciones siguientes se describen los mismos.

Tabla 3-11. Resumen de ensayos y métodos empleados para el análisis de la interfaz F-M, la matriz cementícea y fibras de acero

| Escala de estudio | Elemento a evaluar | Análisis | Método o Norma de referencia, Laboratorio |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Macro-estructural | Matriz | Consistencia | IRAM 1570 (*) |
| | | Resistencia mecánica a flexión y compresión (28d) | UNIT- ISO 679 (*) |
| | Interfaz F-M evaluación de los mecanismos de unión de la interfaz F-M (adherencia química, fricción, anclaje mecánico) | Ensayo de pullout "single-side test" con una única fibra | Según configuración empleada por (Deng et al., 2018) (*) |
| | | Ensayo de pullout "doble-side test" con un conjunto de 16 fibras | Según configuración empleada por (Simões et al., 2017) (*) |
| Micro-estructural | Interfaz F-M (matriz, cemento, fibras de acero) | Microscopio Electrónico de Barrido | Unidad de Microscopía Electrónica de Barrido, Facultad de Ciencias (UdelaR) (**) |

Notas: (*) ensayos realizados por la tesista en el Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería (UdelaR); (**) ensayos realizados por la tesista en la mencionada Unidad de Facultad de Ciencias (UdelaR)

3.3.1 Matriz cementícea

3.3.1.1 Preparación de mezclas

El árido fino se secó a una temperatura de 105°C hasta masa constante en horno.

Para determinar la cantidad de cada material, se utilizan las proporciones indicadas en la Tabla 3-2.

Para el amasado de las mezclas se siguió el procedimiento indicado en la norma UNIT-ISO 679:2009. El instrumental utilizado fue el siguiente:

- Balanza de 4500g / 32Kg de capacidad y una apreciación de 0,1 g / 1g, ver Figura 3-10a.
- Mezcladora conformada por un recipiente de acero inoxidable de 5 dm³ de capacidad y una paleta de acero inoxidable. La mezcladora trabaja a dos velocidades de rotación (lenta: 140 ± 5 min⁻¹; rápida: 285 ± 10 min⁻¹), según norma UNIT 1243:2018, ver Figura 3-10b.
- Espátulas de caucho; regla metálica para enrasar; recipientes metálicos
- Dispositivo para medir el tiempo (con aproximación de 1 s).



Figura 3-10. Instrumental utilizado para la fabricación de las mezclas

La secuencia de incorporación de los materiales, los tiempos y velocidades de mezclado se detallan a continuación:

- Se pesan los materiales por separado (cemento, arena microfibras);
- el agua se pesa directamente en el recipiente de acero inoxidable de 5 dm³ de capacidad, y se le agrega la cantidad de aditivo correspondiente;
- con la mezcladora detenida y en posición de marcha, se vierte el cemento dentro del recipiente que ya contiene el agua y aditivo (ese instante se registra como “tiempo cero” de mezcla) y se mezcla durante 30 s a velocidad lenta;
- a continuación, sin detener la mezcladora, se agrega la arena gradualmente durante los 30 s siguientes y, transcurrido ese tiempo, se sube a velocidad rápida durante otros 30 s;
- se detiene la mezcladora durante 90 s y, con la ayuda de una espátula de caucho, se arrastra toda la mezcla adherida a la pared del recipiente hacia el fondo (durante los primeros 30 s). Transcurridos los 90 s, se mezcla durante 60 s adicionales a velocidad rápida. En el caso de las mezclas que contienen microfibras, éstas son incorporadas durante esos últimos 60 s.

3.3.1.2 Estado fresco: Consistencia

En estado fresco, se evaluó la consistencia de las mezclas buscando que todas tuvieran una consistencia fluida con extendidos de 220 mm ± 20 mm, para lo cual se realizaron ensayos conforme a la norma IRAM 1570. El procedimiento consiste en llenar un molde troncocónico en dos capas, compactando cada una con 20 golpes de un pisón, siendo que el molde debe estar ubicado en forma centrada en el plato de la mesa de sacudidas (Figura 3-11). Una vez enrasado y retirado el molde contenedor, se activa la mesa de sacudidas aplicando 25 golpes.

Posteriormente, se procede a la medición de 4 diámetros de escurrimiento de la muestra, y se realiza el promedio. A partir de dicho diámetro promedio se puede determinar la consistencia de la mezcla. Además, se realiza un análisis visual de las características de la mezcla procurando que no haya ningún índice de exudación ni segregación.



Figura 3-11. Ensayo de consistencia de las mezclas de microhormigón

3.3.1.3 Estado endurecido: resistencia a flexión y compresión

En estado endurecido, se estudió la resistencia a flexión y a compresión de las dos matrices de microhormigón (MH1 y MH2) con los cuatro porcentajes de microfibra polimérica (0%, 0,05%, 0,10%, 0,15%), para lo cual se fabricaron probetas prismáticas de 40x40x160 mm (Figura 3-12) y se ensayaron de acuerdo con la norma UNIT-ISO 679. Luego de transcurridas 24hs después de la fabricación, las probetas fueron desmoldadas y sumergidas en agua hasta la fecha de rotura. Las probetas se ensayaron a los 28 días de edad. Para cada tipo de matriz de microhormigón le corresponde un molde de 3 probetas, que mediante un ensayo previo de flexión son partidas a la mitad y cada una de ellas fue ensayada a compresión obteniéndose así 6 valores de resistencia a compresión. El equipo utilizado para el ensayo fue la prensa PILOT modelo 4 - C47C02 (Figura 3-13) disponible en el Instituto de Ensayo de Materiales (Facultad de Ingeniería, UdelaR).



Figura 3-12. Probetas prismáticas 40x40x160 mm para ensayo de resistencia a flexión y compresión (UNIT-ISO 679)

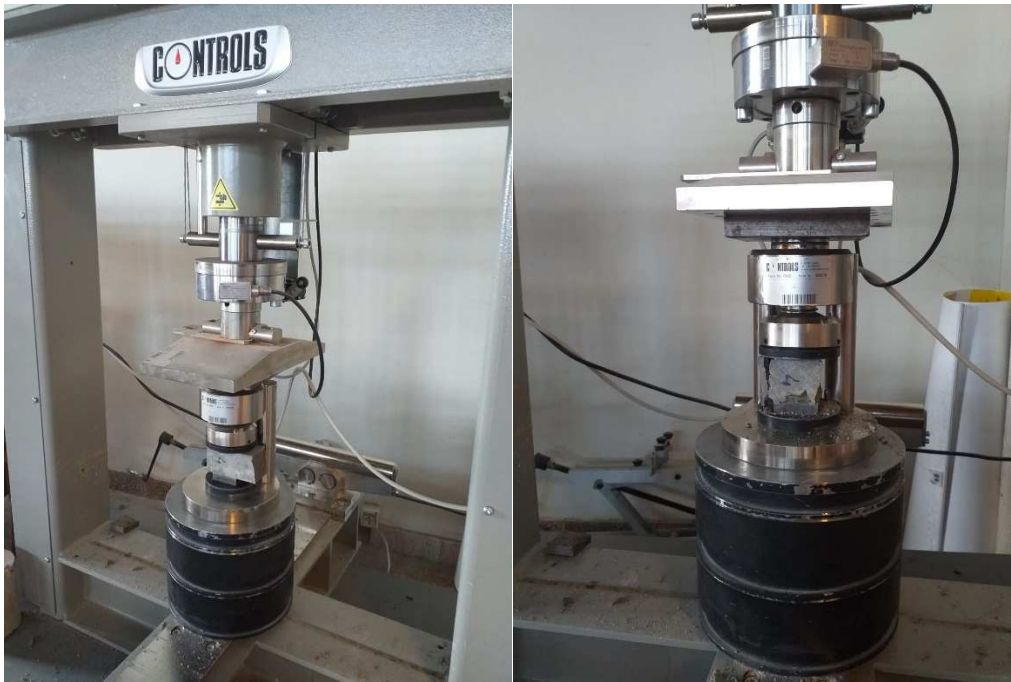


Figura 3-13. Prensa PILOT modelo 4 - C47C02 para ensayo de flexión y compresión (UNIT-ISO 679)

3.3.2 Interfaz fibra-matriz

El análisis de los mecanismos de unión de la interfaz F-M se abordó a través de dos escalas.

Por una parte, a **escala macroestructural**, mediante la evaluación del comportamiento mecánico de ambos tipos de fibras (recta y con gancho) a través del ensayo de pullout, que consiste en el arrancamiento de la fibra metálica de la matriz cementicia. A través del análisis de la relación entre la carga de pullout vs. el desplazamiento de la fibra, se pueden analizar los diferentes mecanismos de unión de la interfaz F-M (adherencia química, fricción, anclaje mecánico).

Por otra parte, a **escala microestructural**, se tomaron muestras de la matriz y de fibras rectas aisladas de las probetas ensayadas por pullout (Dispositivo 1) y se analizó la microestructura de la interfaz F-M, mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), disponible en la Unidad de Microscopía Electrónica de Barrido de la Facultad de Ciencias (UdelAR).

3.3.2.1 Análisis a escala macroestructural: ensayo pullout

Como fue mencionado en el Capítulo 2, el ensayo de pullout de macrofibras no está normalizado y en la literatura científica hay diferentes configuraciones y variantes que se han ido utilizando a lo largo del tiempo. En base a la revisión de artículos científicos realizada y teniendo en cuenta los medios y equipamientos disponibles en laboratorio, es que se adoptaron dos configuraciones diferentes:

- “single-sided test” con una sola fibra según configuración empleada por (Alberti et al., 2016; Deng et al., 2018), e identificada durante la campaña experimental como configuración D1;

- “doble-sided test” con 16 fibras según configuración empleada por (Simões et al., 2017), e identificada durante la campaña experimental como configuración D2.

Al momento de inicio de la Tesis, el ensayo de pullout de fibras de acero embebidas en una matriz cementicia no había sido implementado a nivel nacional. Por lo cual, en la presente sección se realiza una descripción detallada en relación con la configuración de especímenes de ensayo adoptada, la metodología seguida para la elaboración y ensayo de las probetas, y también se indican los parámetros de análisis adoptados.

A. Configuración de especímenes de ensayo (D1 y D2), elaboración y conservación de probetas

Para el caso del **ensayo de pullout de una fibra aislada**, se adoptó la configuración de una probeta cúbica de 100 mm de lado, similar a la configuración empleada por (Deng et al., 2018). Se fabricaron cinco probetas por cada serie fibra-matriz a estudiar. En las Figuras 3-14a y 3-14b se observa la disposición geométrica de las probetas cúbicas con la fibra aislada centrada, con y sin gancho respectivamente, con una longitud de fibra embebida en la matriz de 20 mm en ambos casos.

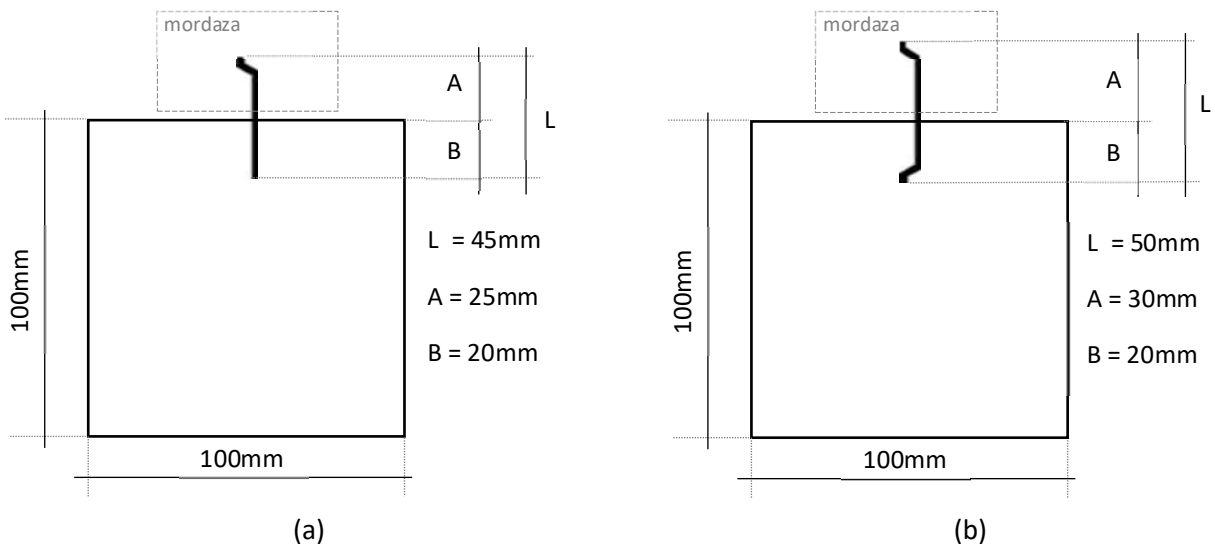


Figura 3-14. Configuración geométrica de las probetas utilizadas para el ensayo de pullout de una fibra aislada: (a) fibra con extremo recto, (b) fibra con extremo con gancho

En cuanto al **ensayo de pullout de un conjunto de 16 fibras**, se adoptó la configuración de probeta utilizada por (Simões et al., 2017). La probeta consiste en dos cubos de hormigón de 100 mm de lado, sin estar adheridos entre sí y conectados solamente por un conjunto de 16 fibras orientadas en una única dirección (alineada con el sentido de la aplicación de la carga) y posicionadas según se observa en la Figura 3-15. En las Figuras 3-16a y 3-16b se observa la disposición geométrica de la probeta de un conjunto de 16 fibras, con y sin gancho respectivamente, con una longitud de fibra embebida en la matriz de 20 mm. En cada cubo de hormigón de la probeta, se dejó embebida una varilla roscada de acero para poder sujetarla durante el ensayo. Se fabricaron cinco probetas por cada serie F-M a estudiar.

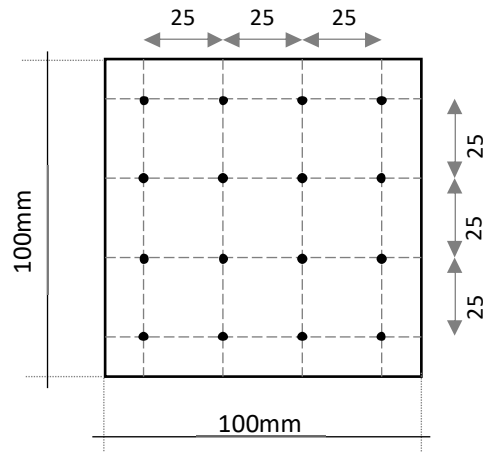


Figura 3-15. Posición del conjunto de 16 fibras

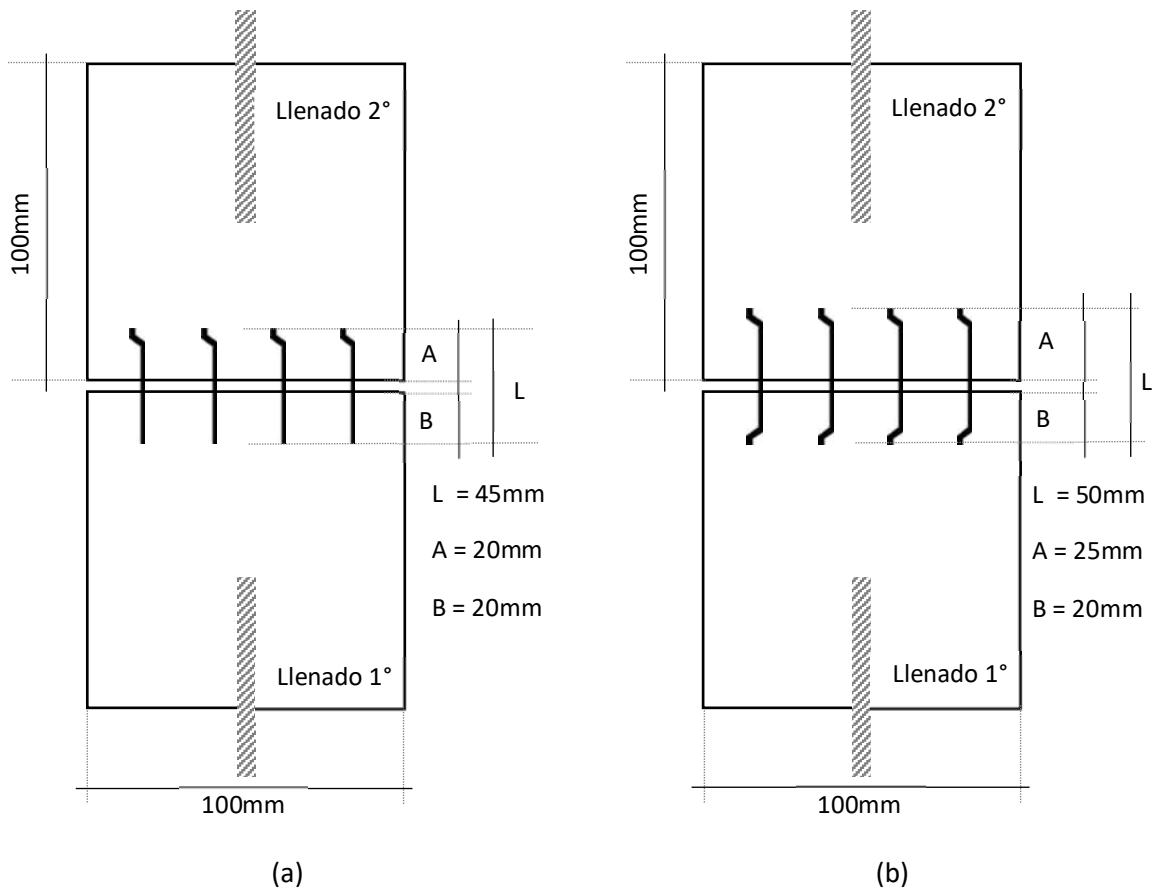


Figura 3-16. Configuración geométrica de las probetas utilizadas para el ensayo de pullout de un conjunto de 16 fibras: (a) fibra con extremo recto, (b) fibra con extremo con gancho.

Para la fabricación de los especímenes de ensayo, se utilizaron moldes metálicos de dimensiones 100mmx100mmx500mm. En las Figuras 3-17 y 3-18 se observa el molde y las adaptaciones realizadas para obtener las configuraciones de ambas probetas, con una fibra aislada (D1) y con un conjunto de 16 fibras (D2) respectivamente. Para asegurar el correcto posicionamiento de

las fibras en el molde, se utilizó cartón espuma y placas de poliestireno expandido adheridos entre sí. Sobre el cartón espuma se marcaba la posición que debían tener las fibras y luego éstas se clavaban controlando su verticalidad y que la longitud embebida de las fibras debía ser 20 mm.



Figura 3-17. Adaptación del molde para la configuración de probeta D1



Figura 3-18. Adaptación del molde para la configuración de probeta D2

Las fibras rectas (Figura 3-19) se obtuvieron cortando cuidadosamente uno de los ganchos del extremo de la fibra. Posteriormente, se midió con un calibre (con precisión 0,05mm) la longitud inicial (L_i) de todas las fibras, verificando que tuvieran un largo de $(45 \pm 0,5)$ mm para las fibras rectas y de $(50 \pm 0,5)$ mm para las fibras con gancho.

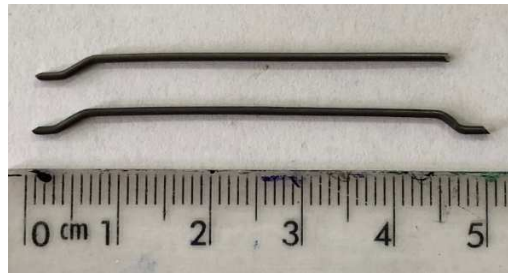


Figura 3-19. Fibra recta y fibra con gancho

En cuanto a la fabricación de las mezclas, relativo a la secuencia de incorporación de los materiales, los tiempos y velocidades de mezclado, se siguió el mismo procedimiento indicado en el apartado 3.3.1.1.

El llenado de cada cubo de 100mm de lado se realizó en dos capas y cada una fue compactada en forma manual aplicando 20 golpes con martillo de goma en ambos laterales del molde metálico. Posteriormente, se enrasa y se protege la cara de llenado (con nylon y paños húmedos por encima) de manera que durante las siguientes 24 horas la mezcla no perdiera humedad. Durante ese tiempo los moldes se conservaron en ambiente de laboratorio: humedad relativa $\geq 50\%$ y temperatura $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Transcurridas 24 horas para las probetas D1 o 48 horas para las probetas D2 desde la fabricación, se desmoldan y se almacenan en cámara húmeda hasta el día del ensayo a los 28 días de edad.

En particular, la secuencia de fabricación de la configuración D1 consistió en:

- Día 1:
- aceitado del molde con aceite mineral (Figura 3-20a);
 - llenado del molde en dos capas y compactado de las mismas y enrasado (Figura 3-20b)
 - protección de la cara de llenado (para su conservación en las primeras 24 horas);
- Día 2:
- desmolde de la probeta luego de 24 horas (Figura 3-20c)
 - verificación que la fibra quedara en la posición correcta: (a) perpendicular a la cara de la probeta; (b) con el calibre se midió la longitud de la fibra que sobresalía para verificar con ello que la fibra hubiera quedado embebida los 20 mm previstos. Se descartaba la probeta si la fibra no quedaba en posición correcta;
 - almacenamiento en cámara húmeda hasta la edad de ensayo.

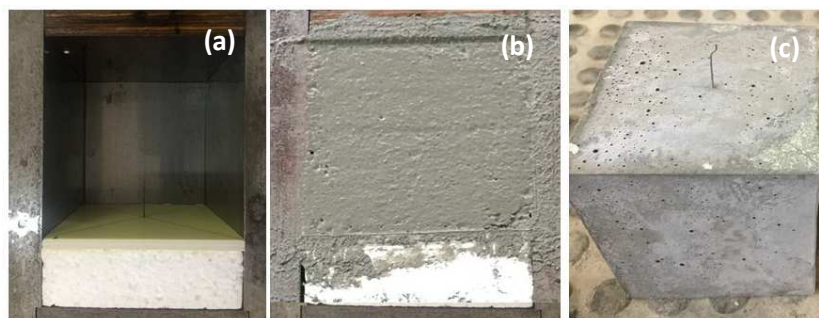


Figura 3-20. Fabricación de probeta con fibra aislada (D1)

La secuencia de fabricación de la configuración D2 consistió en las siguientes etapas:

- Día 1:
- aceitado del molde con aceite mineral (Figura 3-21a);
 - llenado del primer cubo que alojaba las fibras con longitud embebida de 20mm, realizado también en dos capas y compactado de las mismas, y posterior enrasado (Figura 3-21b);
 - protección de la cara de llenado (para su conservación en las primeras 24 horas);
 -
- Día 2:
- retiro de los suplementos de madera del segundo cubo y de la placa de poliestireno expandido (dejando expuestas las fibras metálicas), se verifica que las fibras quedaran en posición perpendicular a la cara de la probeta. Se descartaba la probeta si las fibras no quedaban en posición correcta (Figura 3-21c);
 - aceitado del molde con aceite mineral;
 - llenado del segundo cubo en dos capas y compactado de las mismas, y posterior enrasado (Figura 3-21d);
 - protección de ambos cubos (para su conservación en las siguientes 24 horas);
- Día 3:
- desmolde de la probeta de ensayo a las 48 horas (Figura 3-21e) y almacenamiento en cámara húmeda hasta la edad de ensayo.

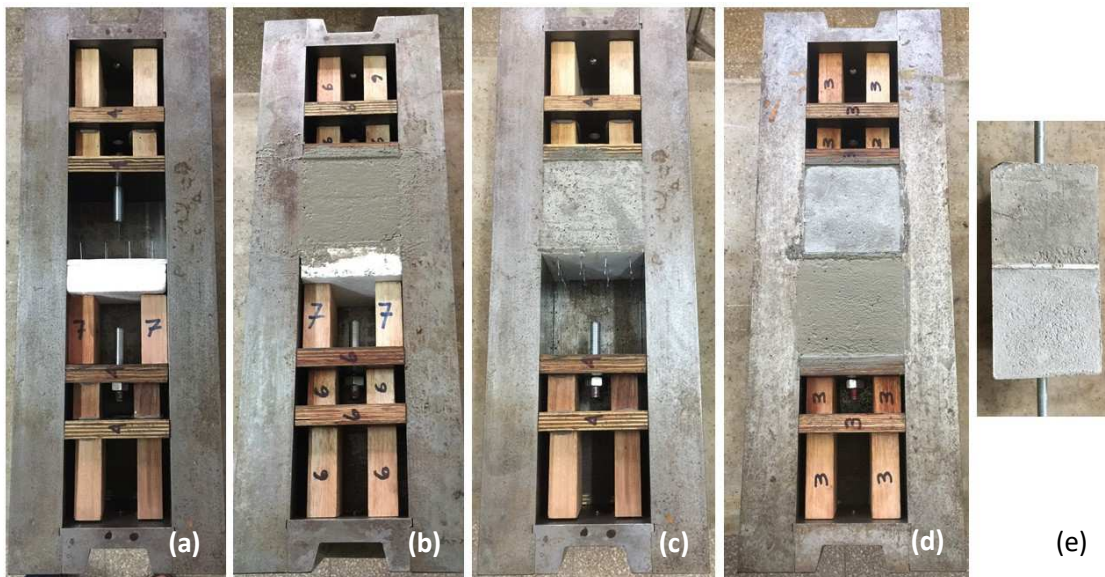


Figura 3-21. Fabricación de probeta con 16 fibras (D2)

B. Ensayo de pullout (fibra aislada y conjunto de fibras)

En ambas configuraciones de ensayo de pullout (D1 y D2) se utilizó la **prensa marca INSTRON** modelo 1011 (Figura 3-22), con una celda de carga de hasta 500kg, disponible en el Instituto de Ensayo de Materiales (Facultad de Ingeniería, UdelaR). La velocidad de carga empleada durante el ensayo fue de 1 mm/min, la cual es la que habitualmente se usa para este tipo de ensayo según la revisión bibliográfica realizada.



Figura 3-22. Prensa INSTRON modelo 1011

Se mandaron fabricar **dispositivos de sujeción de las probetas D1 y D2** basados, por un lado, en los requerimientos y datos de la bibliografía consultada y, por otro, en que pudieran adaptarse a los cabezales de la prensa INSTRON. En cuanto al sistema de sujeción de la probeta con la fibra aislada (D1), en la Figura 3-23 se observa el diseño adoptado del dispositivo de similares características al utilizado por (Deng et al., 2018). En la Figura 3-24 se observa el diseño adoptado del dispositivo de sujeción de la probeta con 16 fibras (D2).

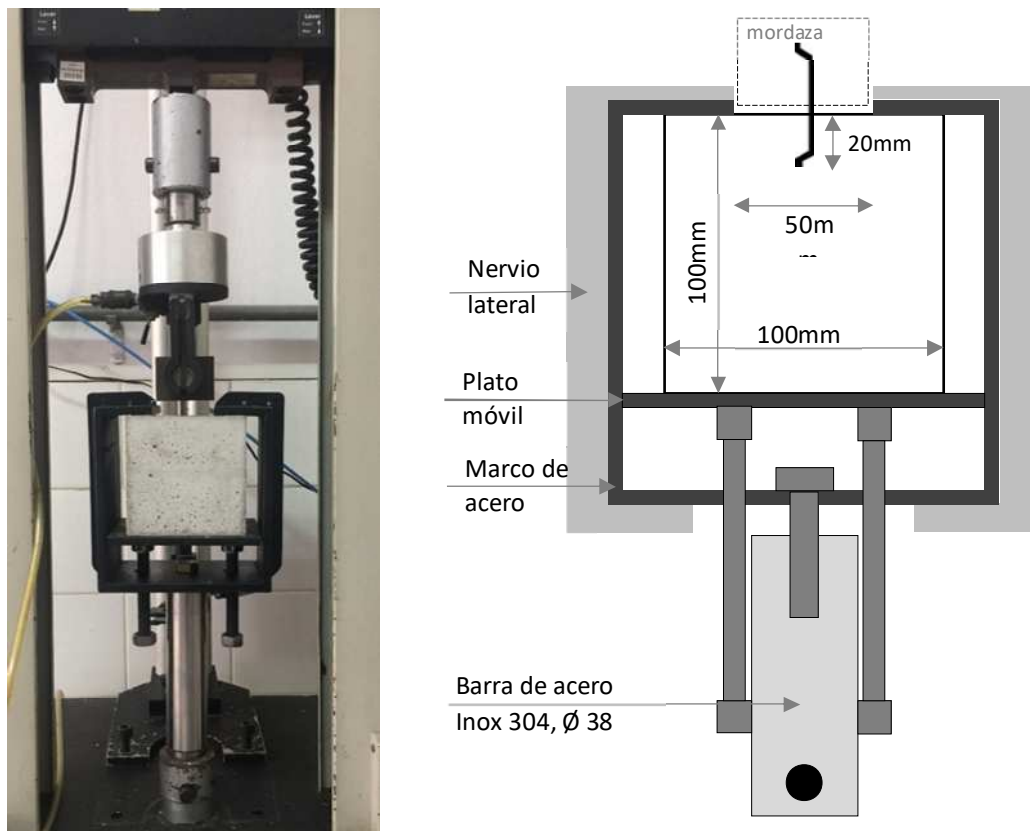


Figura 3-23. Características del sistema de sujeción de la probeta D1

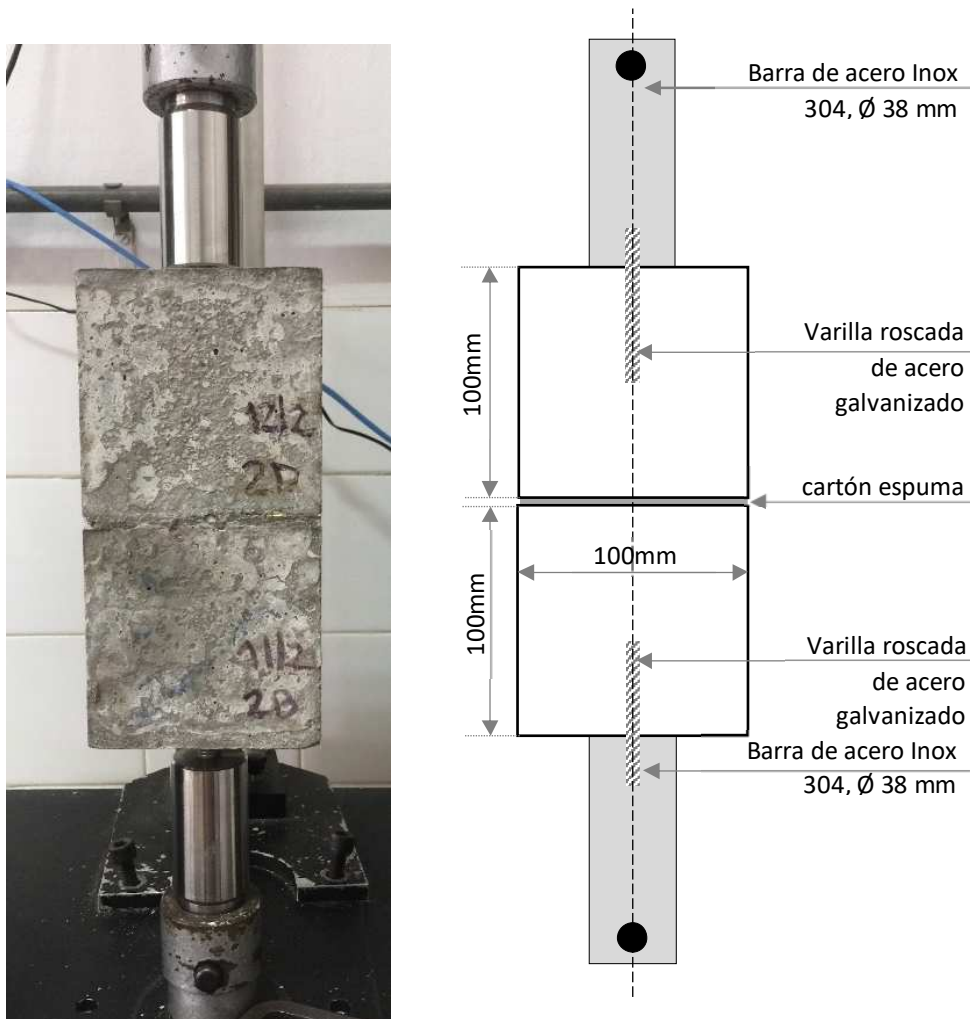
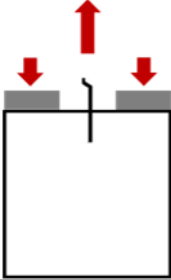
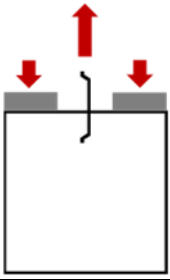
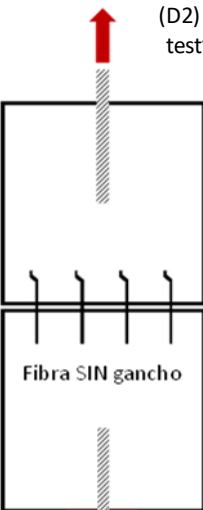
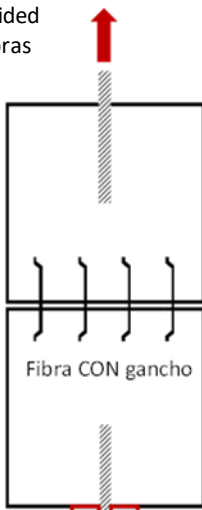
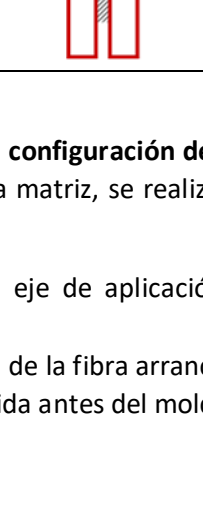
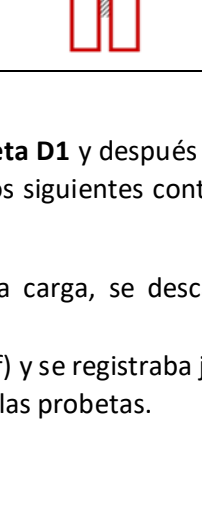
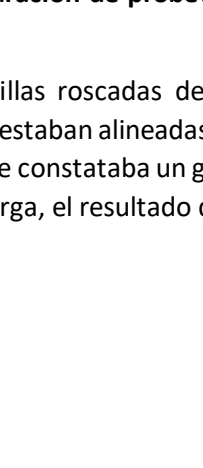
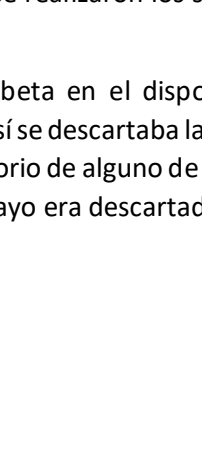


Figura 3-24. Características del sistema de sujeción de la probeta D2

En la Tabla 3-12 se indica el resumen de las diferentes series de probetas fabricadas para evaluar a nivel macroestructural la interfaz F-M, empleando: dos matrices de microhormigón (MH1 y MH2), diferentes contenidos de microfibras poliméricas (0; 0,05; 0,10 y 0,15 %), dos configuraciones de macrofibra de acero con extremo recto (R) y con gancho (G); dos configuraciones de ensayo de pullout (D1 - "single-sided test" con una fibra; D2 - "doble-sided test" con 16 fibras).

En total se elaboraron un total de 16 series para el ensayo "single-sided test" con una única fibra (recta y con gancho) y 16 series para el ensayo "doble-sided test" con conjunto de fibras (recta y con gancho). Como fue mencionado previamente, se fabricaron cinco probetas por cada serie fibra-matriz estudiada, lo cual da un total de 160 probetas.

Tabla 3-12. Series de probetas elaboradas para el ensayo de pullout.

| Matriz Microhormigón (MH) | Contenido de microfibra polimérica (%) | Macrofibra de acero | |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | | con extremo recto (R) | con extremo c/gancho (G) |
| MH 1 (a/agl 0,50; arena/CP 3:1) | 0 |  |  |
| | 0,05 | | |
| | 0,10 | | |
| | 0,15 | | |
| MH 2 (a/agl 0,36; arena/CP 2:1) | 0 |  |  |
| | 0,05 | | |
| | 0,10 | | |
| | 0,15 | | |
| MH 1 (a/agl 0,50; arena/CP 3:1) | 0 |  |  |
| | 0,05 | | |
| | 0,10 | | |
| | 0,15 | | |
| MH 2 (a/agl 0,36; arena/CP 2:1) | 0 |  |  |
| | 0,05 | | |
| | 0,10 | | |
| | 0,15 | | |

Una vez realizado el ensayo de pullout de la **configuración de probeta D1** y después de haber sido arrancada completamente la fibra de la matriz, se realizaron los siguientes controles y/o registros:

- Si la fibra salía torcida respecto al eje de aplicación de la carga, se descartaba el resultado de esa probeta;
- se medía con calibre la longitud final de la fibra arrancada (L_f) y se registraba junto con la longitud inicial (L_i) de la fibra medida antes del moldeo de las probetas.

En cuanto al ensayo de pullout de la **configuración de probeta D2**, se realizaron los siguientes controles y/o registros:

- Si al momento de enroscar las varillas roscadas de la probeta en el dispositivo de sujeción, se constataba que éstas no estaban alineadas entre sí se descartaba la probeta;
- si durante el transcurso del ensayo, se constataba un giro notorio de alguno de los cubos respecto al eje de aplicación de la carga, el resultado del ensayo era descartado;

- si se observaba que, una vez que ambas mitades habían sido separadas y las fibras desprendidas totalmente, las fibras estaban torcidas el resultado de ese ensayo era descartado.

En ambas configuraciones (D1 y D2), una vez finalizado el ensayo de las 5 réplicas de cada grupo se analizaban los gráficos carga-desplazamiento obtenidos, si alguno de esas 5 gráficas carga-desplazamiento presentaba un comportamiento que se apartaba notoriamente del resto de resultados de ese mismo grupo se descartaba.

En particular, en las curvas carga-desplazamiento obtenidas de los ensayos de pullout del dispositivo D2, se observó que aparecía un tramo no lineal en la primera parte del gráfico (comprendido entre 0 - 0,4 mm de desplazamiento) debido a un acomodamiento de la probeta (Figura 3-25), el cual es captado por el equipo de medida. En estos casos se corrigió la posición del origen de las curvas, para lo cual se prolonga la recta que conforma el tramo lineal del gráfico hasta su intersección con el eje de abscisas (recta O'P) y ese punto (O') pasa a ser el nuevo origen de coordenadas.

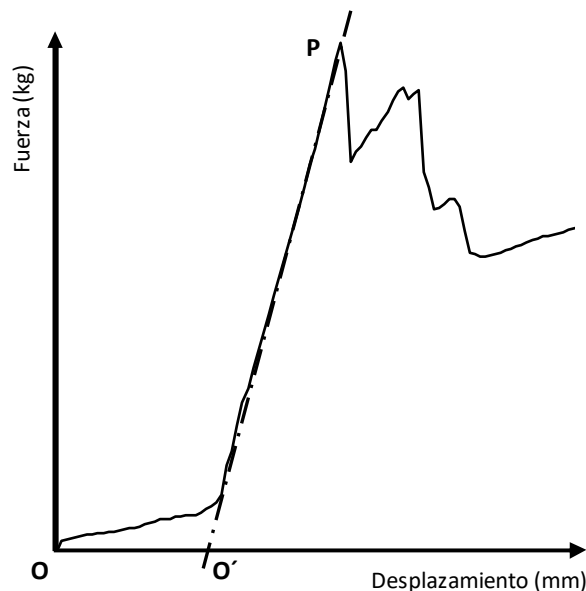


Figura 3-25. Rectificación del origen del gráfico carga-desplazamiento para resultados del dispositivo D2.

C. Parámetros a analizar

En primera instancia, se identificó el modo de falla alcanzado mediante el ensayo de pullout de la/s fibra/s que, según la bibliografía consultada (Alberti et al., 2016; Simoes et al., 2017; Deng et al., 2018), se puede dar de tres formas a través de: el estallido de la matriz, la rotura de la fibra y la falla de la interfaz F-M por extracción de la fibra.

En particular para el ensayo de pullout de la fibra aislada (dispositivo D1), se analizaron las curvas carga-desplazamiento obtenidas y se identificaron diferentes etapas según se trate de fibra con extremo recto o con extremo con gancho. Para ello se tomó como punto de partida las etapas identificadas por Deng et al. (2018), las cuales están representadas sintéticamente en forma teórica en las Figuras 3-26a y 3-26b, respectivamente. En particular, el mecanismo de unión por “adherencia química” de la interfaz F-M se analizó a escala microestructural (MEB) exclusivamente para la configuración del dispositivo D1 con fibra con extremo recto.

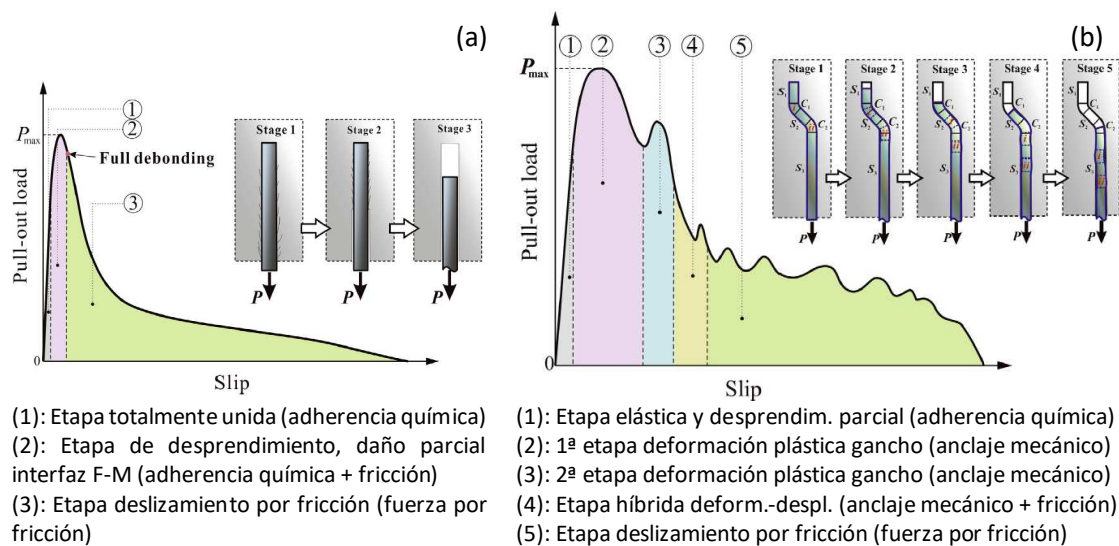


Figura 3-26. Etapas de los mecanismos de unión de la interfaz F-M mediante el ensayo de pullout de una fibra de acero aislada: (a) con extremo recto y (b) con extremo con gancho (Deng et al., 2018)

Por otro lado, en cuanto al ensayo de pullout de un conjunto de 16 fibras (dispositivo D2), también se analizaron las curvas carga-desplazamiento obtenidas y se identificaron diferentes etapas. En este caso, se tomó como punto de partida las etapas identificadas por Simões et al. (2017), las cuales están descritas sintéticamente a continuación:

(1): Primer etapa donde la carga aumenta linealmente hasta alcanzar una carga máxima correspondiente a la **fuerza de adherencia** de la interfaz F-M, donde en una matriz de menor resistencia, la carga máxima corresponde a la adherencia de la interfaz F-M; mientras que en una matriz de alta resistencia, además de la carga máxima por adherencia de la interfaz F-M, se produce una segunda carga máxima aún mayor debido a la fuerza de fricción entre la fibra y la matriz. Para una matriz de alta resistencia, la carga máxima se produce a menores desplazamientos que en una matriz de baja resistencia, lo cual implica que el tramo lineal de la curva presenta una pendiente más pronunciada.

(2): Etapa donde la carga comienza a descender (después que se produce el pico de la carga máxima), que corresponde a la **fuerza por fricción** que se produce entre la fibra y la matriz. Siendo que en una matriz de menor resistencia la caída de la carga es abrupta hasta determinado valor donde la fuerza de fricción se mantiene constante hasta el final del ensayo donde la fibra se extrae completamente. Mientras que en una matriz de alta resistencia, esa caída de la carga ocurre en forma gradual hasta el final del ensayo.

Complementariamente, Simões et al. (2017) determinan el aumento o disminución de la fuerza de fricción expresándolo como un porcentaje de la fuerza de adhesión, según el tipo de matriz.

Además de la identificación de las etapas en la curva carga-desplazamiento de ambos dispositivos (D1 y D2), también se evaluaron parámetros relativos a cargas máximas y energía de pullout (integrando el área debajo de la curva carga-desplazamiento). En las Figuras 3-27, 3-28 y 3-29 se muestran gráficas carga-desplazamiento genéricas, correspondientes al dispositivo

D1 con fibra recta, al dispositivo D1 con fibra con gancho y al dispositivo D2 (fibras rectas y con gancho), respectivamente, en donde se indican los parámetros a ser analizados:

- P_1 : primera carga máxima correspondiente a la adherencia química (MH1 y MH2);
- P_2 : segunda carga máxima correspondiente a la adherencia química (MH2);
- P_{G1} : primera carga máxima provocada por el anclaje mecánico del gancho;
- P_{G2} : segunda carga máxima provocada por el anclaje mecánico del gancho;
- E_p : energía de pullout para diferentes valores de desplazamientos según sea para el dispositivo D1 (0,5mm; 4mm; 12mm) o para el dispositivo D2 (0,5mm; 1,5mm; 15mm).

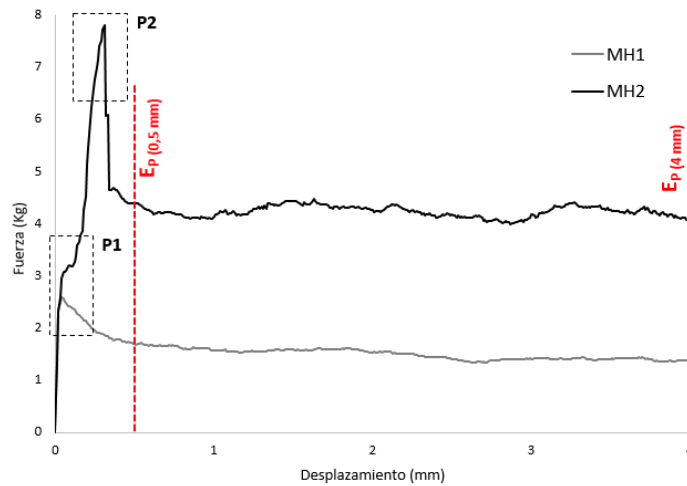


Figura 3-27. Parámetros a evaluar (P_1 , P_2 , E_p) en la curva carga-desplazamiento para el dispositivo D1 con fibra de acero con extremo recto

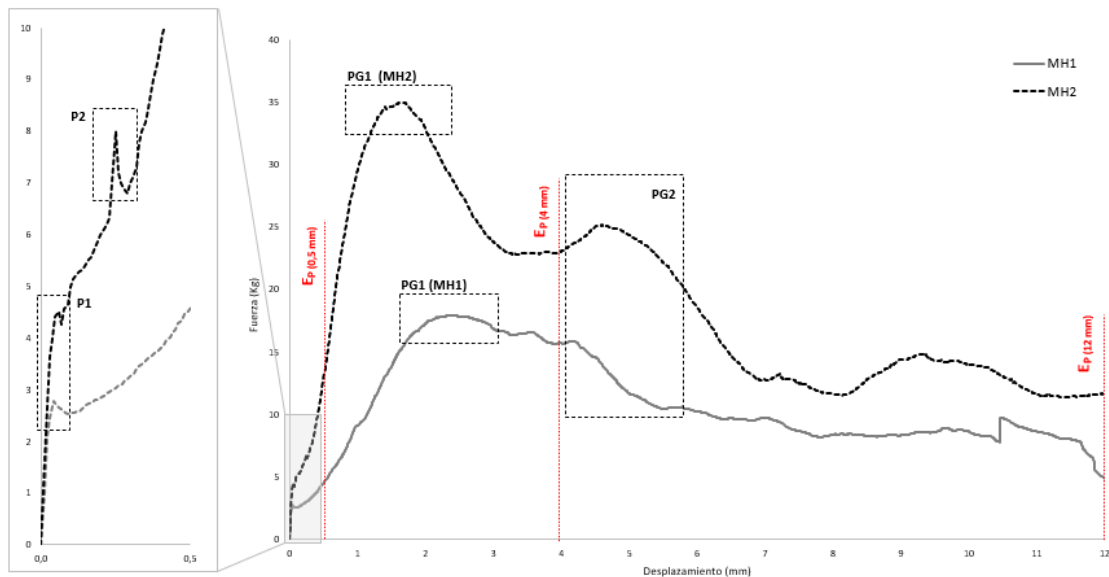


Figura 3-28. Parámetros a evaluar (P_1 , P_2 , P_G , E_p) en la curva carga-desplazamiento para el dispositivo D1 con fibra de acero con extremo con gancho

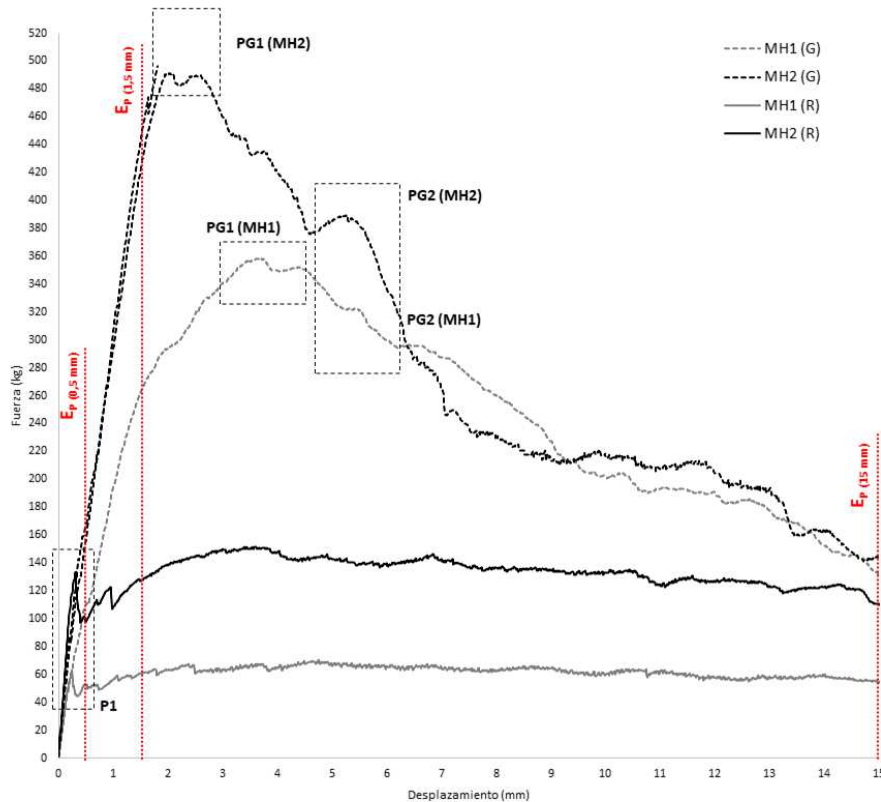


Figura 3-29. Parámetros a evaluar (P_1 , P_G , EP) en la curva carga-desplazamiento para el dispositivo D2 con fibra de acero con extremo recto y con gancho

El desempeño de la interfaz F-M se evaluó según la influencia que tuvo el tipo de matriz (microhormigón de resistencia normal 40MPa y microhormigón de alto desempeño de 60MPa), la geometría de la fibra (extremos rectos o con ganchos) y la incorporación de diferentes contenidos (0,05%, 0,10% y 0,15%) de microfibras poliméricas.

3.3.2.2 Análisis a escala microestructural: MEB

Se realizó el análisis de imágenes obtenidas mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) equipado con un detector de rayos X de energía dispersa (EDS), disponible en la Unidad de Microscopía Electrónica de Barrido de la Facultad de Ciencias (UdelaR). Mediante esta técnica (MEB) además de analizarse muestras de cemento sin hidratar y fibras de acero en su estado original, cuyas imágenes se presentaron en las Figuras 3.1, 3.6 y 3.7, se analizó la microestructura de la interfaz F-M. Para ello se estudiaron muestras de matriz y fibras obtenidas después de realizar el ensayo de pullout de las probetas con una única fibra (con extremo recto), en particular, las muestras de la matriz corresponden a la zona del surco que deja la fibra al ser arrancada.

A. Preparación y conservación de muestras de la matriz

Para obtener las muestras de matriz a ser analizadas, las probetas de 100x100x100 mm fueron partidas en dos mitades. Para ello se utilizaron dos barras de acero de sección circular centradas en caras opuestas de la probeta y sobre las cuales se ejerce presión suficiente (mediante los

platos de la prensa) hasta la rotura. En la Figura 3-30 se muestra la probeta antes y después de ser partida en dos mitades. Luego ambas mitades fueron reducidas por fractura hasta obtener el trozo de matriz que contenía el surco dejado por la fibra al ser arrancada durante el ensayo de pullout, en la Figura 3-31 puede observarse un ejemplo.

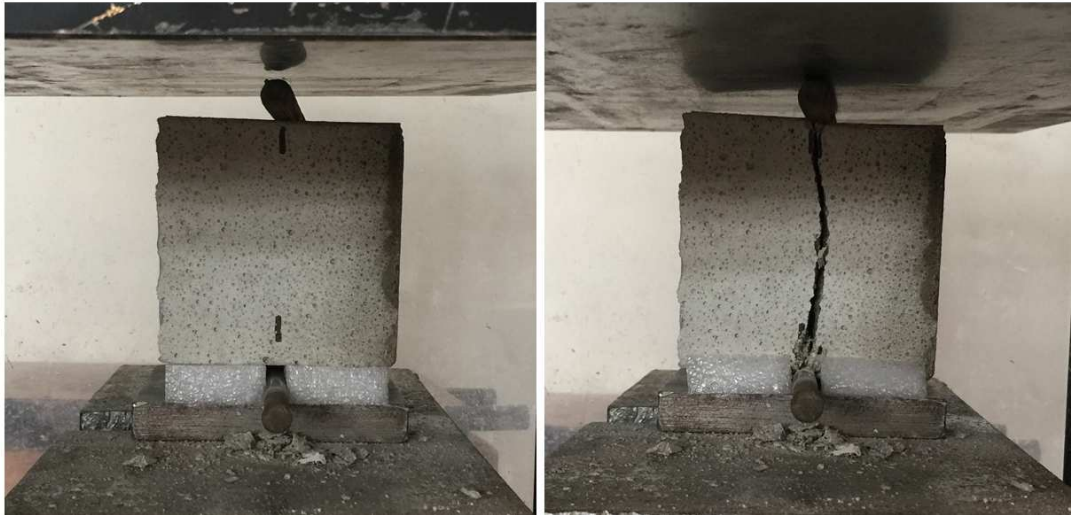


Figura 3-30. Probeta partida en dos mitades para extraer muestra



Figura 3-31. Muestra de la matriz en la zona del surco que deja la fibra al ser arrancada

Aquellas muestras de ensayo que no fueran a ser analizadas inmediatamente después de su obtención fueron sometidas al siguiente proceso para frenar la hidratación del cemento y conservadas hasta la fecha de análisis:

- las muestras de matriz se sumergen en un recipiente que contenga acetona (Figura 3-32a), se mueve cuidadosamente el contenido hasta observar que no salgan más burbujas (evacuando todo el aire de la muestra);
- se retira la muestra de la acetona e inmediatamente se envuelve en film de nylon;

- se identifica cada muestra y se colocan dentro de un desecador (Figura 3-32b), al cual se le hace vacío mediante bomba de vacío, manteniendo el mismo hasta la fecha de análisis de la muestra.



Figura 3-32. Muestras de la matriz: (a) sumergidas en acetona y (b) conservación al vacío dentro de desecador

B. Microscopio Electrónico de Barrido con detector de rayos X de energía dispersa

El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB, o SEM sigla en inglés “Scanning Electron Microscopy”), equipo JEOL JSM 5900LV (Figura 3-33), cuenta con un cañón que emite un haz de electrones que barre la superficie de la muestra y reemite partículas (electrones secundarios) y produce rayos X. Estos electrones secundarios son captados por sensores, que reconstruyen una imagen tridimensional de la superficie permitiendo así observar con gran resolución la topología de muestras muy pequeñas.

Por otra parte, el Microscopio está equipado con un detector de rayos X de energía dispersa (EDS sigla en inglés “Energy Dispersive Spectroscopy”), que a través del uso de electrones retrodispersados permite identificar la composición química del sector que se está observando.

Antes del análisis de las imágenes mediante MEB, las muestras se hacen conductoras metalizando la superficie con oro por pulverización catódica con el equipo DESK II DENTON VACUUM (Figura 3-34). En la Figura 3-35 se observan las muestras de (a) cemento, (b) fibras de acero y (c) de la matriz antes y después de la metalización con oro.



Figura 3-33. Microscopio Electrónico de Barrido (JEOL JS M 5900LV) equipado con detector de rayos X de energía dispersa (EDS).



Figura 3-34. Equipo DESK II DENTON VACUUM que metaliza la superficie de las muestras con oro

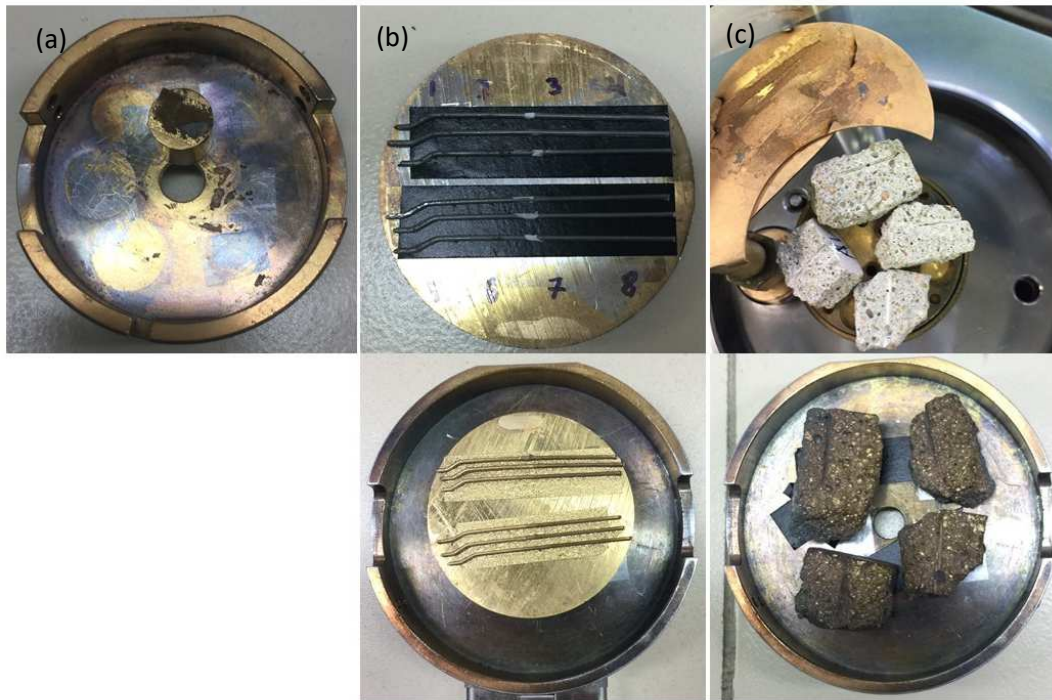


Figura 3-35. Muestra de cemento en polvo (a), fibras de acero (b) y muestras de matriz (c), antes y después de la metalización con oro

C. Parámetros a analizar

Se realizaron análisis de imágenes MEB con diferentes aumentos (x70, x200, x500, x1000, x2000, x6500) correspondientes a:

- fibras de acero arrancadas durante el ensayo de pullout
- muestras de la matriz en la zona del surco que deja la fibra al ser arrancada, analizando distintos sectores que están esquematizados en la Figura 3-36:
 - en el valle del surco,
 - en los bordes del surco (izquierdo y/o derecho), en el cual se identificaron dos zonas: zona superior del borde correspondiente a la zona de transición entre F-M (identificada como Borde Z_{deT}) y la zona inferior del borde correspondiente a la "ladera" del surco (identificada como Borde $_{surco}$).

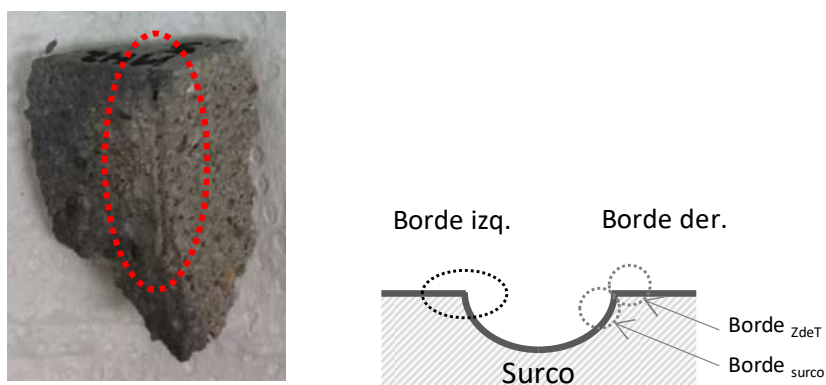


Figura 3-36. Zonas del surco a analizar mediante MEB

Los aspectos analizados mediante las imágenes MEB fueron:

1. En lo que refiere a la matriz, se observó:
 - a) el valle del surco: se analizó la “huella” que dejaba la fibra en la matriz (copiando la superficie de la fibra) o indicios de arrancamiento de matriz que hayan quedado adheridos a la fibra, identificándose así una zona “lisa” (matriz sin adherir a la fibra) y una zona “rugosa” (matriz arrancada por la fibra),
 - b) los bordes del surco (Borde _{zdeT}, Borde _{surco}) y el valle del surco: se analizó la presencia de fisuras, poros, cristales de hidróxido de calcio (CH), cristales de silicato de calcio hidratado (CSH), etringita, cemento sin hidratar, aspecto de la matriz en cuanto a porosidad y compacidad (estructura más o menos densa).
2. En lo que refiere a la superficie de las fibras de acero, se observó:
 - a) el aspecto de la superficie de la fibra, si era lisa o con restos de matriz adherida,
 - b) en particular, en los sectores de matriz adherida, se analizó la presencia de fisuras, poros, cristales de hidróxido de calcio (CH), cristales de silicato de calcio hidratado (CSH), etringita.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los resultados obtenidos mediante ensayos de pullout, considerando las variables estudiadas (geometría de la fibra de acero, la composición y resistencia de la matriz en microhormigón, el contenido de microfibra polimérica), se realizó mediante ANOVA de una vía. Se consideraron diferencias significativas con un alfa menor o igual a 0,05.

Capítulo 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en cuanto al estudio de la matriz cementícea y de la interfaz F-M, así como también su análisis y discusión.

En el apartado 4.1 se presentan los resultados referentes a la **matriz cementícea** relativos a la consistencia en estado fresco y a su resistencia mecánica (flexión y compresión) en estado endurecido a los 28 días de edad.

En el apartado 4.2 se presentan los resultados relativos al análisis a diferentes escalas de la interfaz F-M. A escala macroestructural (apartado 4.2.1), refiere al comportamiento mecánico de ambos tipos de fibras (recta y con gancho) a través del ensayo de pullout en base a las dos configuraciones analizadas: con una fibra aislada (D1) y con un grupo de 16 fibras (D2). Donde a través del análisis de la relación entre la carga de pullout vs. el desplazamiento de la/s fibra/s, se evidencian los diferentes mecanismos de unión de la interfaz F-M (adherencia química, fricción, anclaje mecánico). A escala microestructural (apartado 4.2.2), se presentan los resultados del análisis de imágenes por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) del surco dejado por la fibra una vez arrancada, de la superficie de la fibra, y de la zona de transición (ZdeT) entre F-M. En el apartado 4.2.3 se realiza una correlación de los resultados a nivel macro y microestructural. En cuanto al análisis estadístico, se emplearon los criterios establecidos en el apartado 3.4 del capítulo anterior.

4.1 MATRIZ CEMENTÍCIA

4.1.1 Estado fresco: Consistencia

En la Figura 4-1 se presentan los resultados de diámetros de escurrimiento de las ocho mezclas de microhormigón con y sin microfibras poliméricas, obtenidos siguiendo el método establecido por la norma IRAM 1570. Los valores graficados representan el promedio de la medición de 4 diámetros de escurrimiento de cada muestra. A partir de dicho diámetro promedio se puede determinar la consistencia de las mezclas.

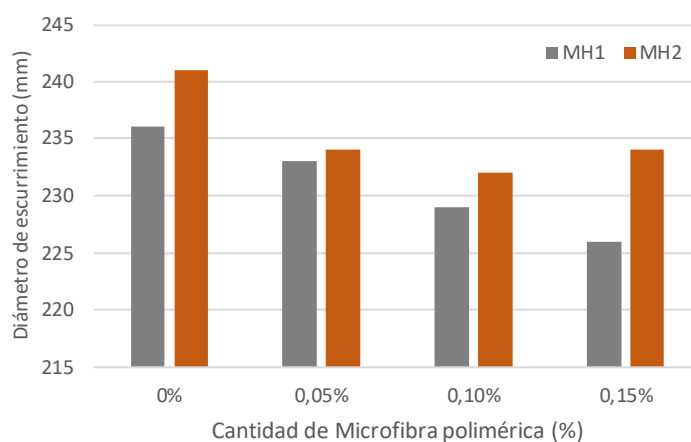


Figura 4-1. Consistencia de las mezclas de microhormigón (IRAM 1570)

Se observa que todas las mezclas tienen una consistencia fluida, con diámetros de escurrimiento comprendidos en el rango $220 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$. Para lograr esos valores de escurrimiento, se ajustó el contenido de aditivo según lo indicado en la Tabla 3-2, observándose que las mezclas MH2 requirieron mayor cantidad de aditivo que las mezclas MH1, y a su vez, dentro de cada grupo las mezclas con mayor contenido de microfibra polimérica (0,15%) requirieron más aditivo que el resto. Además, en base al análisis visual de las características de las mezclas, se observó que ninguna de ellas presentó indicios de exudación ni de segregación.

4.1.2 Estado endurecido: resistencia a flexión y compresión

En la Figura 4-2 se presentan los resultados de resistencia a flexión y compresión de las dos matrices de microhormigón (MH1 y MH2) con los cuatro porcentajes de microfibra polimérica (0%, 0,05%, 0,10%, 0,15%), siguiendo los lineamientos establecidos por la norma UNIT-ISO 679. Los valores graficados representan el promedio de 3 valores para flexión y 6 valores para compresión por cada mezcla.

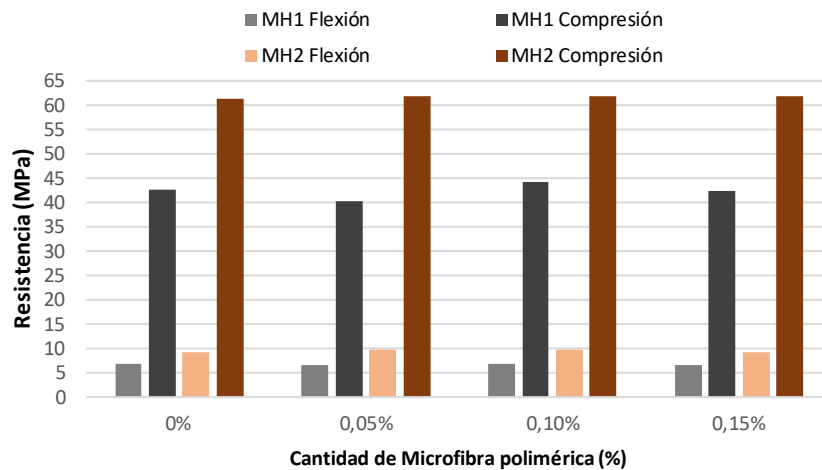


Figura 4-2. Resultados de resistencia a flexión y compresión (UNIT-ISO 679) de las mezclas de microhormigón.

Analizando los resultados, puede observarse una diferencia significativa en los valores de resistencia a flexión y compresión entre las matrices MH1 y MH2. En cambio, dentro de cada grupo no hay diferencia significativa en cuanto a los diferentes contenidos de microfibra polimérica. Los valores promedio de resistencia a flexión y compresión alcanzados por la matriz MH1 son de 6,7 MPa y 42,4 MPa, y para la Matriz MH2 son de 9,4 MPa y 61,7 MPa, respectivamente.

4.2 INTERFAZ FIBRA-MATRIZ

4.2.1 Análisis a escala macroestructural: ensayo pullout

Para cada tipo de mezcla y de dispositivo se ensayaron 5 probetas, y de las curvas carga-desplazamiento obtenidas del ensayo de pullout se descartaron aquellas que no fueran válidas según los criterios indicados en el Capítulo 3 (apartado 3.3.2.1 parte B). Para cada tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibra polimérica utilizada (0%; 0,05%; 0,10%; 0,15%), se

grafican las curvas carga-desplazamiento representando con trazo fino los resultados obtenidos de las diferentes probetas ensayadas y en trazo grueso la curva promedio de éstas.

En todos los ensayos realizados durante la campaña experimental, el modo de falla (estallido de la matriz, rotura de la fibra, falla de la interfaz F-M) que ocurrió para los diferentes tipos de probetas fue por extracción de la/s fibra/s, es decir que el elemento que falla es la interfaz F-M.

4.2.1.1 Resultados del ensayo de pullout para la configuración de fibra aislada (Dispositivo D1)

En las Figuras 4-3 a 4-6 se presentan las curvas carga-desplazamiento obtenidas del ensayo de pullout del dispositivo D1 con fibra de acero aislada y con extremo recto para las mezclas MH1 y MH2 y con los porcentajes de microfibras poliméricas de 0%, 0,05%, 0,10% y 0,15%, respectivamente. Para cada una de ellas, se presenta la curva completa hasta los 4mm de desplazamiento y se señalan las cargas máximas alcanzadas: (P₁) primera carga máxima de adherencia química (MH1 y MH2); (P₂) segunda carga máxima de adherencia química (MH2).

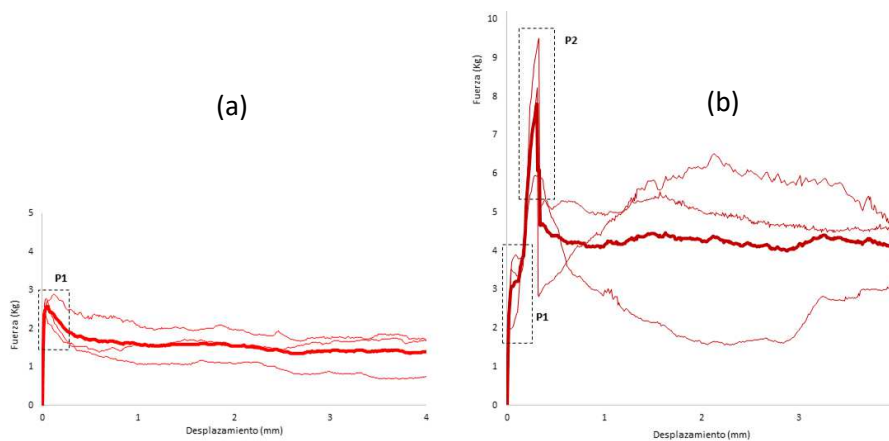


Figura 4-3. Curvas carga-desplazamiento de D1 para: (a) MH1/0/R y (b) MH2/0/R

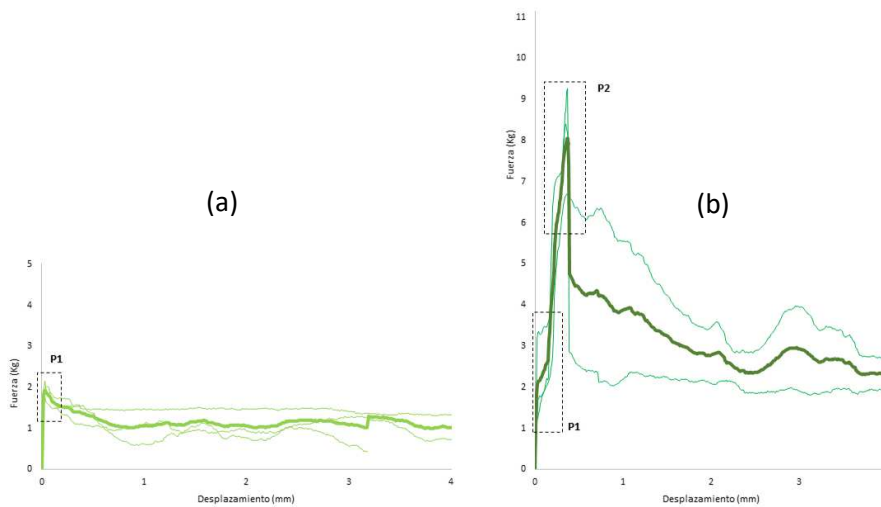


Figura 4-4. Curvas carga-desplazamiento de D1 para: (a) MH1/5/R y (b) MH2/5/R

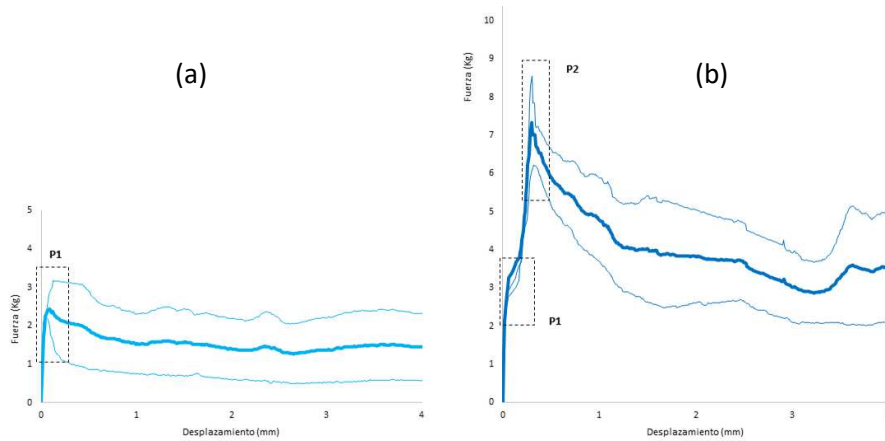


Figura 4-5. Curvas carga-desplazamiento de D1 para: (a) MH1/10/R y (b) MH2/10/R

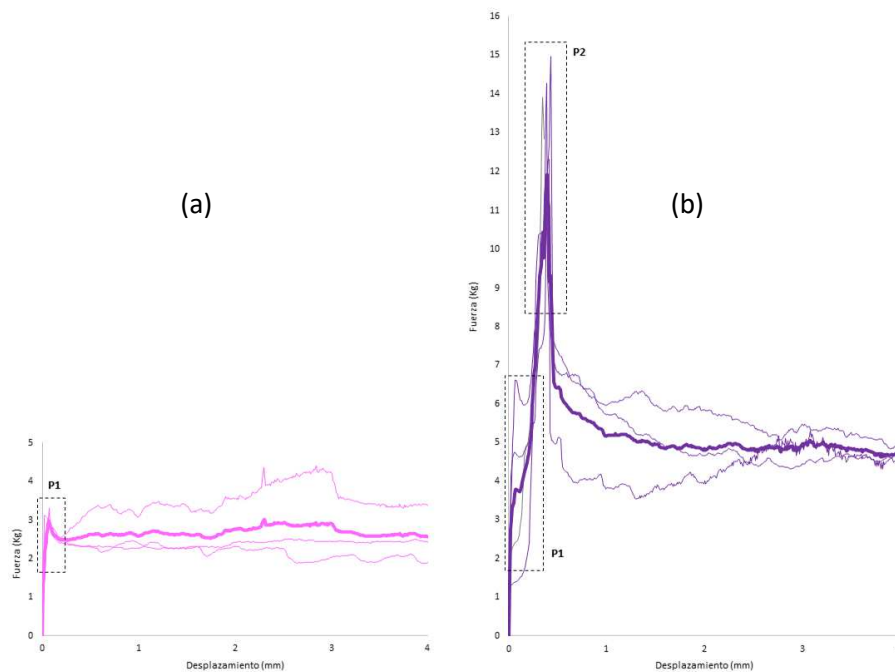


Figura 4-6. Curvas carga-desplazamiento de D1 para: (a) MH1/15/R y (b) MH2/15/R

A modo de resumen, en la Figura 4-7 se presentan las curvas promedio carga-desplazamiento obtenidas del ensayo de pullout del dispositivo D1 con fibra de acero recta, para las mezclas MH1 y MH2 con los diferentes porcentajes de microfibras poliméricas (0%, 0,05%, 0,10%, 0,15%). Puede observarse que para ambas matrices se alcanza una primera carga máxima (P_1). Para el caso de la matriz MH1, a partir del valor de P_1 la carga cae hasta un punto y se mantiene constante hasta el final. Mientras que para la matriz MH2, a partir del valor de P_1 la carga comienza a aumentar nuevamente hasta alcanzar una segunda carga máxima (P_2), y a continuación la carga cae hasta cierto valor y luego permanece constante.

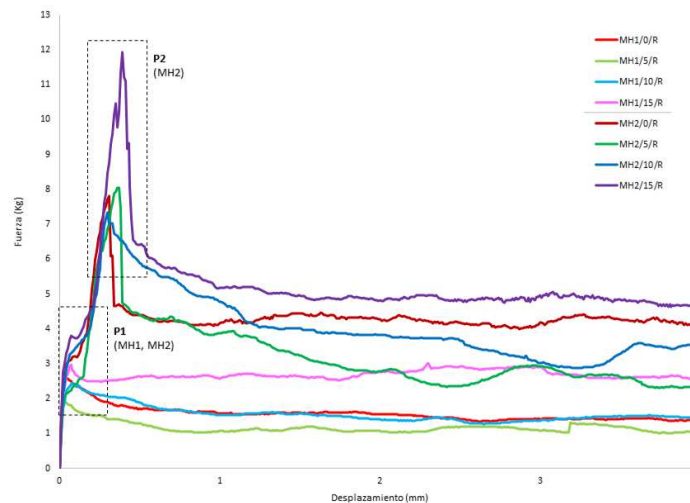


Figura 4-7. Curvas carga-desplazamiento promedio con la configuración del dispositivo D1 con fibra de acero con extremo recto

En el esquema de la Figura 4-8 se describen las etapas del comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo recto, tomando como punto de partida a (Deng et al., 2018) pero con una diferenciación observado en el comportamiento de la matriz MH2, mientras que en la Figura 4-9 se muestran gráficamente dichas etapas.

| | MH1 | MH2 |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Etapa 1 | ETAPA TOTALMENTE UNIDA: prevalece la adherencia química entre F-M | |
| Etapa 2 | ETAPA DE DESPRENDIMIENTO: LA INTERFAZ F-M SE DAÑA PARCIALMENTE La carga llega a un valor máximo (P_1) correspondiente al pico de adherencia química en la interfaz F-M, y a partir de este punto la carga comienza a disminuir porque la interfaz F-M se daña parcialmente (pérdida de adherencia química) y en forma conjunta comienza a actuar la fuerza de fricción entre la fibra y la matriz. A partir de este momento ambas matrices tienen un comportamiento diferente: | |
| | Para MH1 se alcanza la <u>carga máxima P_1</u> y luego ésta cae hasta un punto y se mantiene constante hasta el final | Para MH2 se alcanza la primera <u>carga máxima P_1</u> (adherencia química) Luego la carga comienza a aumentar nuevamente hasta alcanzar la segunda <u>carga máxima P_2</u> (adherencia química + fricción), y a continuación la carga cae hasta un cierto valor y luego permanece constante hasta el final |
| Etapa 3 | ETAPA DE DESLIZAMIENTO POR FRICCIÓN: ocurre el desprendimiento total entre F-M y actúa solamente la fuerza de fricción entre ambas | |

Figura 4-8. Etapas del comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo recto.

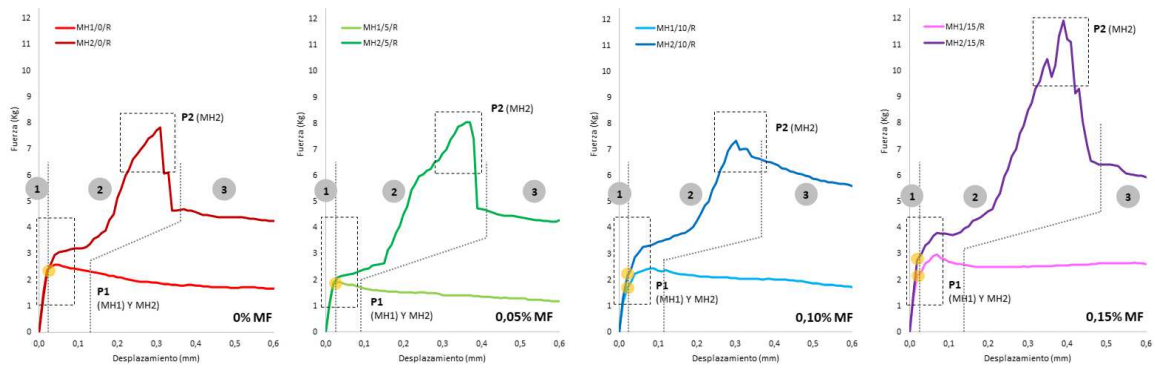


Figura 4-9. Etapas del comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo recto, según el tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibra polimérica

En base a los resultados obtenidos de las curvas carga-desplazamiento de las fibras con extremo recto, para cada uno de los especímenes ensayados se identificaron los siguientes valores de cargas máximas y energía de pullout, y se determinaron los valores promedio de:

- P₁: primera carga máxima correspondiente a la adherencia química (en MH1 y MH2), en (kg), que corresponde a la carga pico alcanzada entre 0 - 0,1 mm de desplazamiento;
- P₂: segunda carga máxima de adherencia química (MH2), en (kg), que corresponde a la carga pico alcanzada entre 0,1 - 0,5 mm de desplazamiento;
- E_p: energía de pullout en los desplazamientos 0,5mm y 4mm, en (kg.m).

En las Figuras 4-10a y 4-10b se expresan mediante diagramas de barras, los valores promedio para las cargas máximas de adherencia química P₁ y P₂ respectivamente, para las fibras de acero con extremo recto. Mientras que en las Figuras 4-11a y 4-11b se grafican los valores promedios de energía de pullout hasta los 0,5 mm (EP_(0,5mm)) y hasta los 4 mm (EP_(4mm)), respectivamente. En los gráficos se indican, en forma complementaria, el porcentaje de aumento o disminución de los valores tomando como 100% el valor de la matriz de referencia (sin microfibra), para cada tipo de matriz (MH1 y MH2).

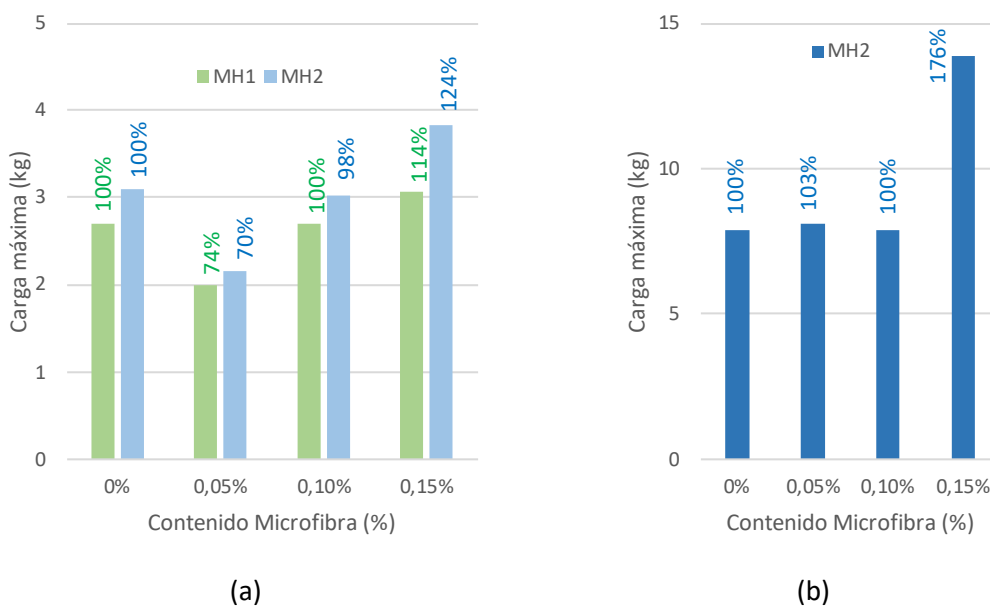


Figura 4-10. Cargas máximas de adherencia química para fibra de acero con extremo recto: (a) primer pico (P₁) para MH1 y MH2; (b) segundo pico (P₂) para MH2

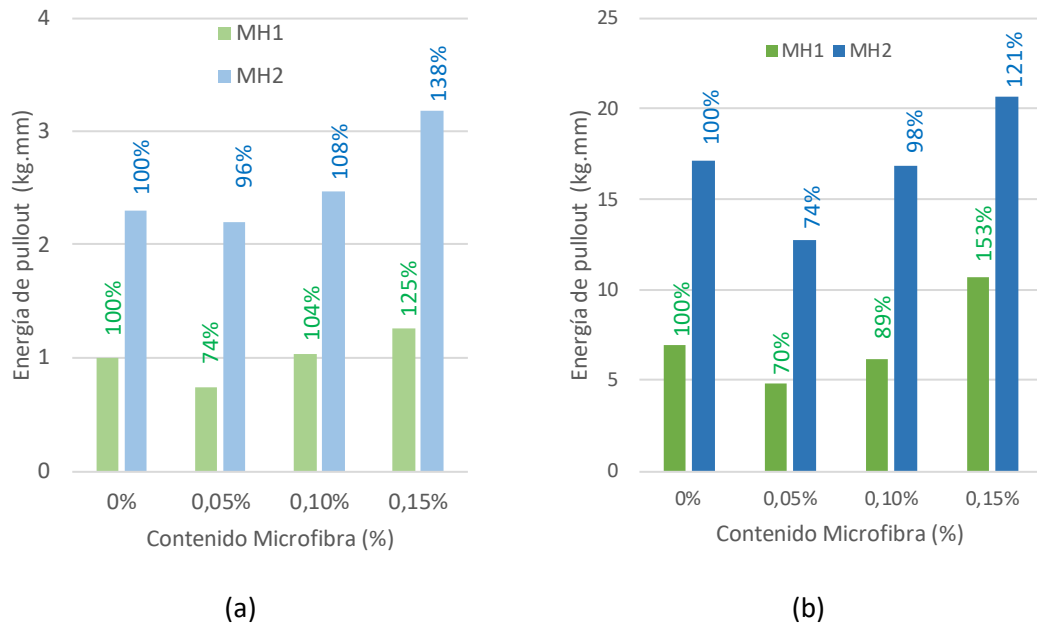


Figura 4-11. Energía de pullout para fibra de acero con extremo recto: (a) hasta 0,5mm ($EP_{(0,5mm)}$); (b) hasta 4mm ($EP_{(4mm)}$)

En base a los resultados obtenidos, se realiza un análisis general y de cada uno de los mecanismos involucrados en el comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo recto:

a) Análisis general:

- EFECTO MATRIZ: observando las Figuras 4-7, 4-9, 4-10 y 4-11, se puede ver que las mezclas de MH2 presentan resultados mejores frente a las mezclas MH1, en cuanto a los siguientes parámetros: cargas máximas (P_1 , P_2), fuerza de fricción y energía de pullout (E_p).
- EFECTO MICROFIBRA: observando la Figura 4-7, dentro de cada tipo de matriz (MH1 y MH2) la presencia de 0,15% de microfibra polimérica tiene una incidencia mayor en los mismos parámetros.

b) Análisis del mecanismo de adherencia química de la interfaz F-M:

- EFECTO MATRIZ: En particular, para las mezclas MH1 se produce una sola carga máxima (P_1), mientras que para las mezclas MH2 se producen dos cargas máximas (P_1 y P_2), según se aprecia en las Figuras 4-7 y 4-9. En ambas mezclas la carga máxima P_1 se produce en la misma zona, siendo que la matriz MH2 presenta valores mayores. En cambio para la matriz MH2, a partir del valor de P_1 (pico de adherencia química) la carga comienza a aumentar nuevamente hasta alcanzar una segunda carga máxima (P_2) correspondiente por un lado a la adherencia química de la interfaz F-M parcialmente dañada y por otro a la fuerza de fricción, ambas actuando en forma conjunta. Una de las causas de esta diferencia en el comportamiento de ambas matrices en la Etapa 2, se puede deber a que la matriz MH2 es más fuerte que la MH1, por contener mayor cantidad de cemento y una relación agua-cemento menor que hace que sea mayor su resistencia a compresión; como la resistencia a tracción del hormigón está relacionada con la resistencia a compresión (International Federation for Structural Concrete (fib), 2010; Mehta & Monteiro,

2006; Ministerio de Fomento, 2011), la matriz MH2 resiste mejor los esfuerzos internos de tracción que se producen en la interfaz F-M que rodea la fibra de acero.

- EFECTO MICROFIBRA: en cuanto a la primera carga máxima (P_1), en la Figura 4-9 si se observa en particular el punto donde la curva comienza a separarse del tramo lineal del gráfico, se puede visualizar que el contenido de microfibra polimérica afecta el comportamiento, lo cual se observa claramente para los contenidos de 0,10% y 0,15% de microfibra.

Por otra parte, la presencia de las microfibras colabora en el “cosido” de microfisuras que aparecen en la interfaz F-M, aportándole un mejor desempeño, lo cual es más evidente para el mayor porcentaje de microfibras empleado (0,15%) como puede observarse en las Figuras 4-10 y 4-11. Este mismo efecto es señalado por Deng et al. (2018), pero en este trabajo el aporte de las microfibras poliméricas es más notorio, debido seguramente a que las microfibras utilizadas tienen dimensiones (largo 15 mm; diámetro 0,03 mm) y características mecánicas (resistencia a tracción de 400 MPa; módulo de elasticidad de 4 GPa) mayores que los de las fibras usadas en la presente Tesis (largo 12 mm; diámetro 0,018 mm; resistencia a tracción de 300 MPa; módulo de elasticidad de 3 GPa), siendo iguales los porcentajes de microfibras empleados en ambos casos.

- c) Análisis de la fuerza de fricción entre la fibra y la matriz y de la energía de pullout: fue comentado en el análisis general.

Por otra parte, se presentan a continuación las curvas carga-desplazamiento obtenidas del ensayo de pullout del dispositivo D1 con fibra de acero aislada y con extremo con gancho para las mezclas MH1 y MH2 y con los diferentes porcentajes de microfibra polimérica de 0% (Figura 4-12), 0,05% (Figura 4-13), 0,10% (Figura 4-14) y 0,15% (Figura 4-15), respectivamente. Para cada una de ellas, se presenta la curva completa hasta los 12mm de desplazamiento y se señalan las cargas máximas alcanzadas: (P_1) primera carga máxima de adherencia química (MH1 y MH2); (P_2) segunda carga máxima de adherencia química (MH2); primera (P_{G1}) y segunda (P_{G2}) carga máxima provocada por el anclaje mecánico del gancho.

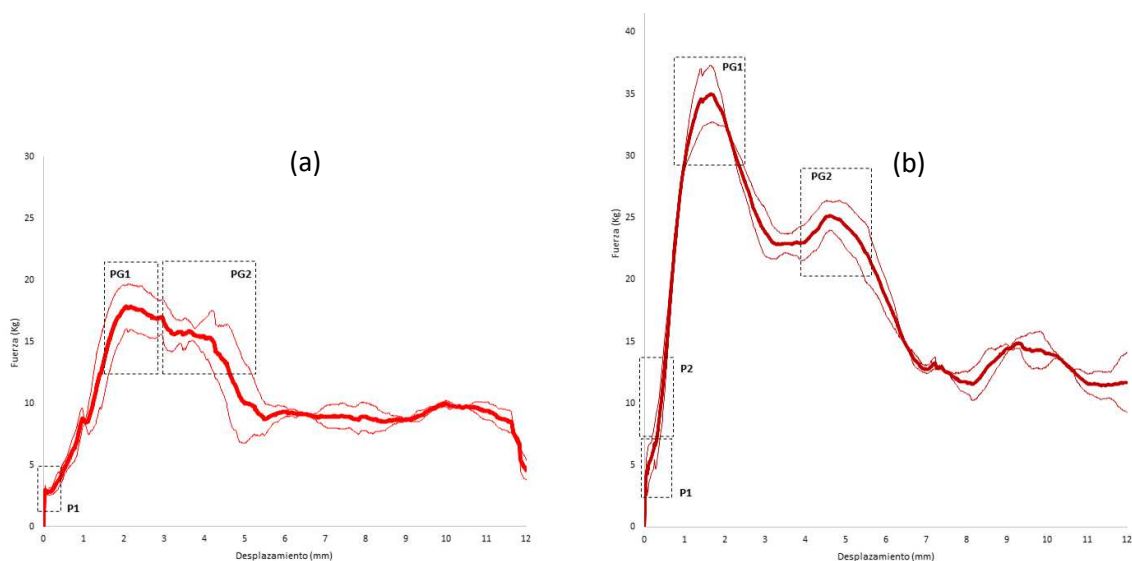


Figura 4-12. Curvas carga-desplazamiento de D1 para (a) MH1/0/G y (b) MH2/0/G

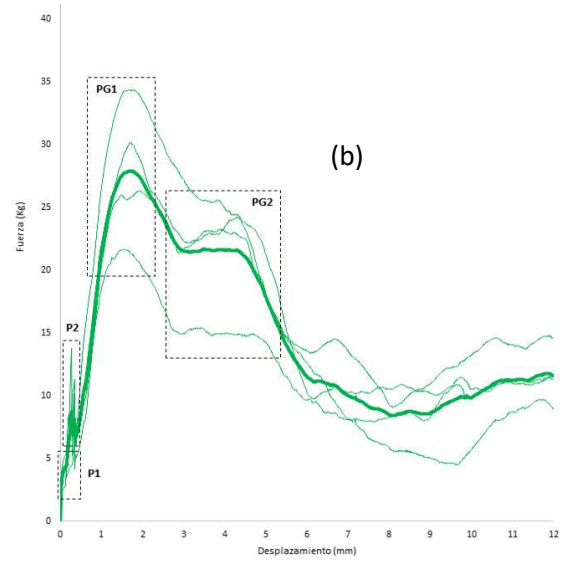
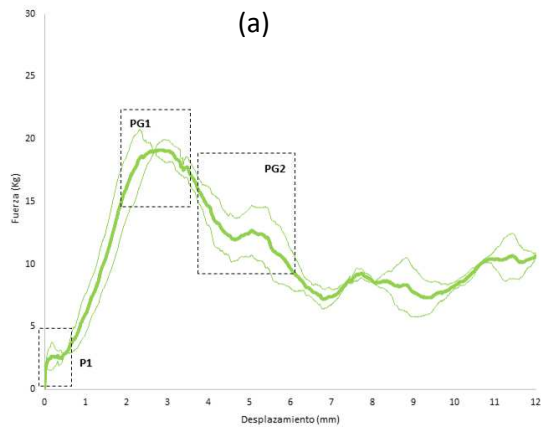


Figura 4-13. Curvas carga-desplazamiento de D1 para (a) MH1/5/G y (b) MH2/5/G

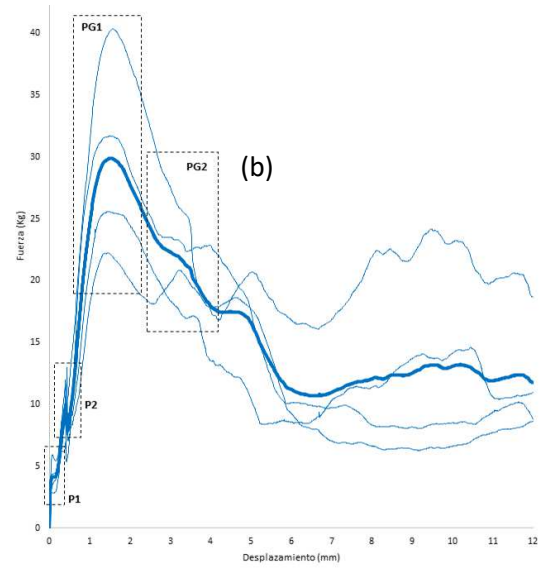
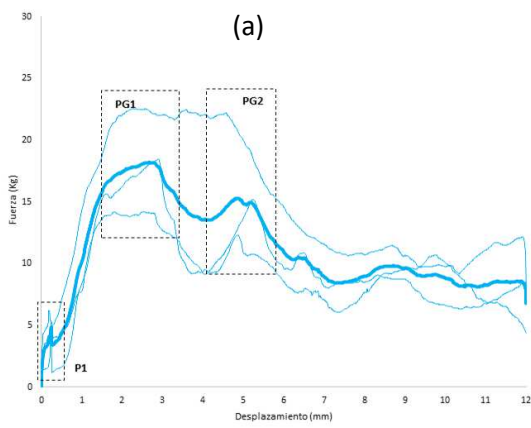


Figura 4-14. Curvas carga-desplazamiento de D1 para (a) MH1/10/G y (b) MH2/10/G

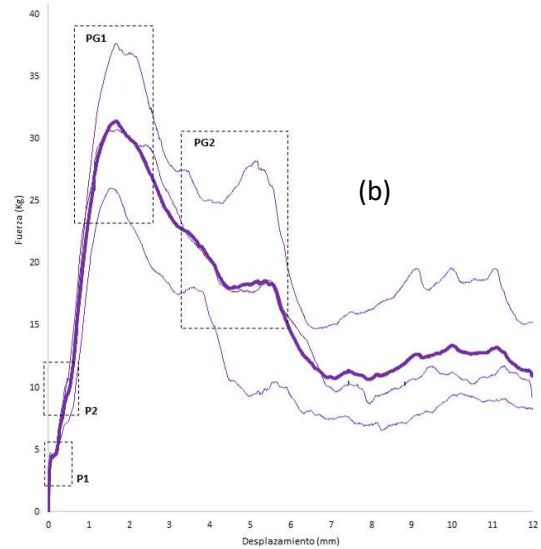
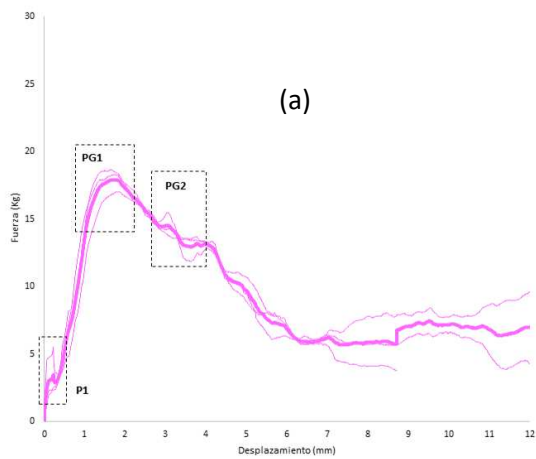


Figura 4-15. Curvas carga-desplazamiento de D1 para (a) MH1/15/G y (b) MH2/15/G

A modo de resumen, en la Figura 4-16 se presentan las curvas promedio carga-desplazamiento obtenidas del ensayo de pullout del dispositivo D1 con fibra de acero con extremo con gancho, para las mezclas MH1 y MH2 con los diferentes porcentajes de microfibra polimérica (0%, 0,05%, 0,10%, 0,15%). En este caso, el mecanismo que domina es el anclaje mecánico que ofrece el gancho teniendo una incidencia mucho mayor en las cargas de pullout alcanzadas. De todas formas, se siguen apreciando en las primeras instancias del ensayo las dos cargas máximas de adherencia química (P_1 y P_2), a partir de las cuales, la carga empieza a aumentar nuevamente en forma lineal, seguido por un tramo no lineal hasta alcanzar la primera carga máxima provocada por el anclaje mecánico del gancho (P_{G1}). Posteriormente la carga comienza a descender y se produce una segunda carga máxima por el anclaje mecánico del gancho (P_{G2}). A partir de allí la carga va descendiendo gradualmente.

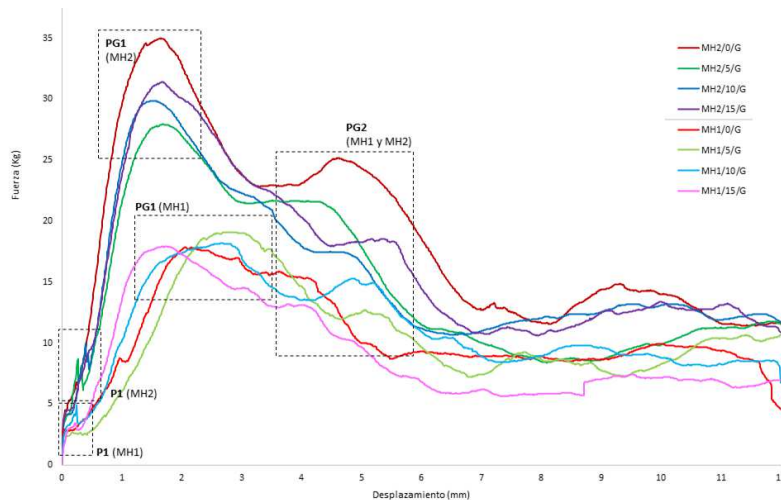


Figura 4-16. Curvas carga-desplazamiento promedio con la configuración del dispositivo D1 con fibra de acero con extremo con gancho

A continuación, se describen las etapas del comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo con gancho, tomando como punto de partida a (Deng et al., 2018), las cuales se indican en la Figura 4-17.

- (1) Etapa elástica y de desprendimiento parcial: La curva incluye una parte lineal (etapa elástica) y una parte no lineal (desunión parcial de la interfaz F-M) antes de que la fibra con gancho se desprenda por completo, en este primer tramo la fuerza de adhesión química es la que prevalece. Además, se puede observar que esta primera etapa se corresponde con las dos primeras etapas observadas para las fibras con extremo recto. En este tramo es que se producen los picos de cargas P_1 (MH1y MH2) y P_2 (MH2);
- (2) Primera etapa de deformación plástica: Después de que la fibra se despegó por completo, los segmentos curvos y rectos que conforman el gancho comienzan a querer deslizarse en el conducto y, por lo tanto, estos segmentos de fibra se someten progresivamente a flexiones y deformaciones plásticas, lo que conduce a un aumento sustancial de la carga de pullout. La carga máxima de pullout (P_{G1}) ocurre cuando el deslizamiento está en el rango entre 0,5 mm y 2,5 mm para la matriz MH2, y entre 1mm y 3,5 mm para la matriz MH1;
- (3) Segunda etapa de deformación plástica: Después de alcanzar el valor máximo (P_{G1}), la carga de extracción cae a un cierto valor hasta que nuevamente los segmentos curvos y rectos del gancho se ven sometidos a nuevas deformaciones plásticas, pero ahora en

sentidos contrarios, y la carga de extracción por pullout alcanza el segundo pico máximo (P_{G2});

- (4) Etapa híbrida deformación-deslizamiento: se produce una disminución moderada de la carga de extracción, y la resistencia que se opone a la extracción se compone de la fricción a lo largo del conducto y la deformación plástica decreciente;
- (5) Etapa de deslizamiento por fricción: Cuando todas las partes en forma de gancho viajan a través del conducto, se detecta una resistencia residual que se produce por la fuerza de fricción sin más deformación plástica de la fibra de acero. Esta fuerza residual es siempre mayor que la de las fibras rectas debido al enderezamiento incompleto del gancho.

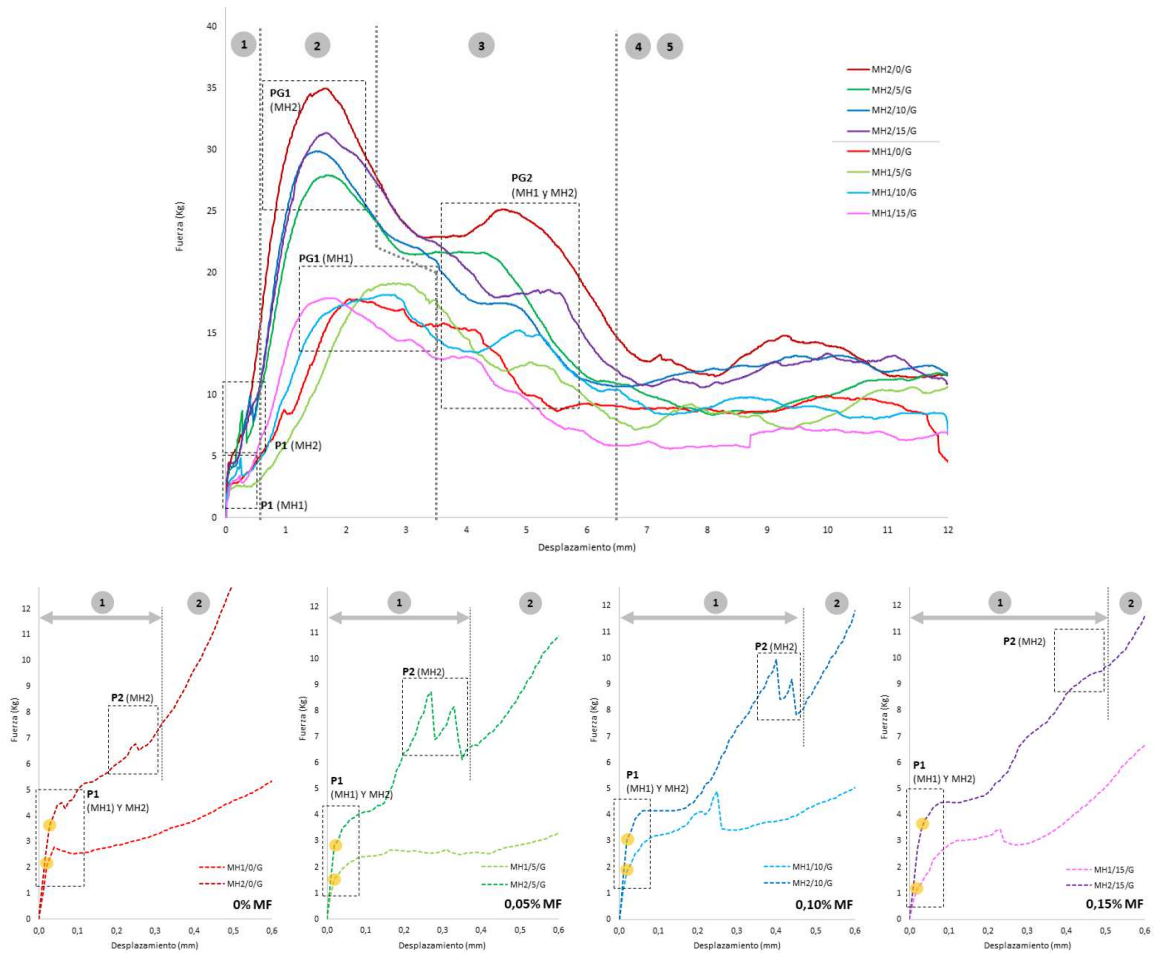


Figura 4-17. Etapas del comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo con gancho, según el tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibra polimérica

Considerando los resultados obtenidos de las curvas carga-desplazamiento de las fibras con extremo con gancho, para cada uno de los especímenes ensayados se identificaron los siguientes valores de cargas máximas y energía de pullout, y a partir de ellos se determinaron los valores promedio de:

- P_1 : primera carga máxima correspondiente a la adherencia química (en MH1 y MH2), en (kg), que corresponde a la carga pico alcanzada entre 0 - 0,1 mm de desplazamiento;
- P_2 : segunda carga máxima de adherencia química (MH2), en (kg), que corresponde a la carga pico alcanzada entre 0,1 - 0,5 mm de desplazamiento;

- P_{G1} : primera carga máxima provocada por el anclaje mecánico del gancho, en (kg), que corresponde a la carga pico alcanzada entre 0,5 - 4,0 mm de desplazamiento;
- E_p : energía de pullout en los desplazamientos 0,5mm, 4mm y 12mm, en (kg.m).

En base a ello, en las Figuras 4-18a, 4-18b y 4-18c se expresan mediante diagramas de barras, los valores promedio para las cargas máximas de adherencia química (P_1 y P_2) y de anclaje mecánico (P_{G1}) respectivamente, para las **fibras de acero con extremo con gancho**. Mientras que en las Figuras 4-19a, 4-19b y 4-19c se grafican los valores promedios de energía de pullout hasta los 0,5 mm ($EP_{(0,5mm)}$), hasta los 4 mm ($EP_{(4mm)}$) y hasta los 12 mm ($EP_{(12mm)}$), respectivamente. Asimismo, se indican los porcentajes de aumento o disminución de los valores tomando como 100% el valor de la matriz de referencia (sin microfibras), para cada tipo de matriz (MH1 y MH2).

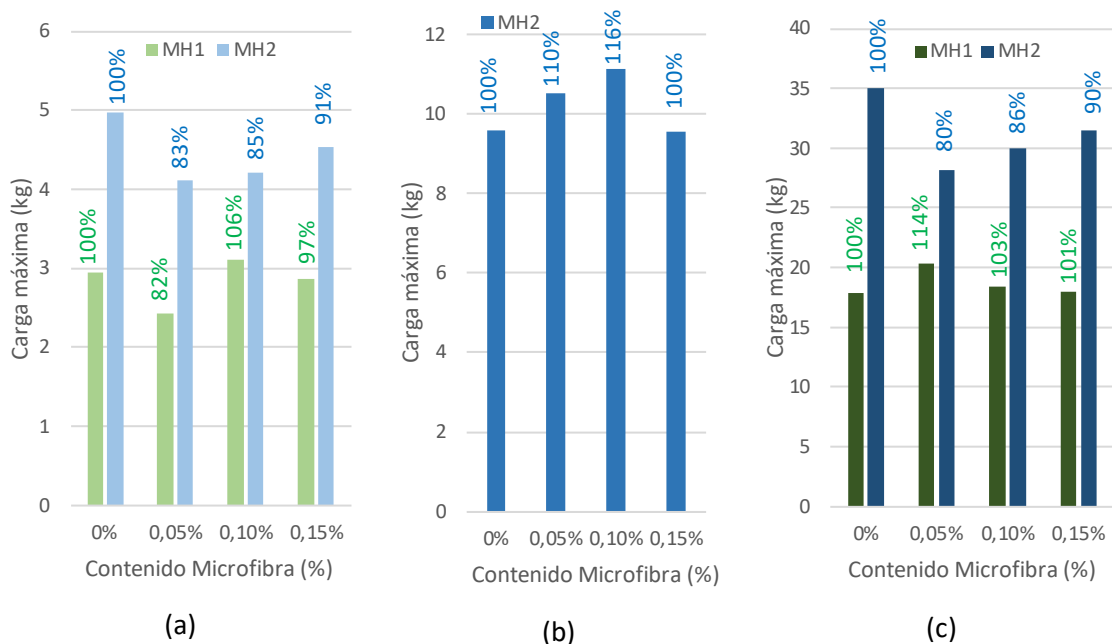


Figura 4-18. Cargas máximas de adherencia química (a) primer pico P_1 y (b) segundo pico P_2 ; y (c) primera carga máxima de anclaje mecánico (P_{G1}) para fibra de acero con extremo con gancho

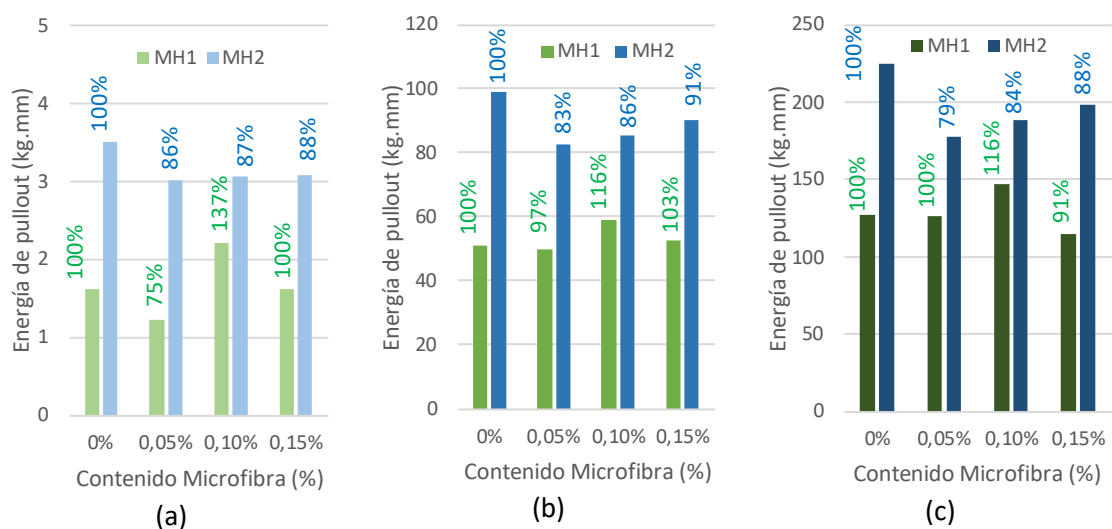


Figura 4-19. Energía de pullout para fibra de acero con extremo con gancho hasta desplazamientos de: (a) 0,5mm; (b) 4mm; (c) 12mm

En la Figura 4-16 se puede observar que la curva carga-desplazamiento promedio obtenida del ensayo de pullout de las probetas de la mezcla de referencia MH2/0/G dio muy alta en relación

a lo esperado, lo cual no concuerda con la tendencia que presentan los demás resultados obtenidos tanto con el dispositivo 1 con fibra recta, como se verá más adelante con el dispositivo 2 con fibras rectas y con ganchos, donde la curva de la matriz de referencia en cada caso no es la que presenta los valores más altos dentro de cada grupo. Debido a ello, los resultados de la referencia MH2/0/G dejan dudas en cuanto a su validez pudiendo haber incidido algún factor durante la fabricación de las probetas que de momento se desconoce; debido a ello es que en los gráficos de las Figuras 4-18 y 4-19 los valores de los parámetros analizados correspondientes a la referencia MH2/0/G siempre son más altos que el resto de las mezclas.

En base a lo mencionado previamente y a los resultados obtenidos, se realiza un análisis general y de cada uno de los mecanismos involucrados en el comportamiento de extracción por pullout de una fibra de acero con extremo con gancho:

a) Análisis general:

- EFECTO MATRIZ: observando las Figuras 4-16 a 4-19, las mezclas de MH2 presentan mejores resultados frente a las mezclas MH1, en cuanto a los siguientes parámetros: pendiente del tramo lineal de la curva carga-desplazamiento (adherencia química de la interfaz F-M), cargas máximas de adherencia química (P_1 , P_2), cargas máximas correspondientes al anclaje mecánico (P_{G1} y P_{G2}), fuerza de fricción y energía de pullout (E_P). Se explica con los mismos motivos previamente expuestos.
- EFECTO MICROFIBRA: si no se tuviera en cuenta el resultado de la referencia (MH2/0/G), mencionado previamente, se puede observar que para la matriz MH2 hay una tendencia a ir incrementando los valores de los parámetros (P_1 , P_2 , P_G , E_P) a medida que aumenta el contenido de microfibra.

b) Análisis del mecanismo de adherencia química de la interfaz F-M:

- EFECTO MATRIZ: Analizando la pendiente del tramo lineal de la curva carga-desplazamiento (Figura 4-17), se observa que las matrices MH2 presentan pendientes más pronunciadas que las mezclas de la matriz MH1. Al igual que para las fibras de acero con extremo recto, en las mezclas MH1 se produce una sola carga máxima de adherencia química (P_1), mientras que para las mezclas MH2 además se produce una segunda carga máxima (P_2).
- EFECTO MICROFIBRA: no se observa una influencia clara para la matriz MH1, mientras que para la matriz MH2 el efecto ya fue comentado en el análisis general.

c) Análisis del anclaje mecánico generado por la presencia del gancho:

Como fue mencionado previamente, después de que la fibra se despegó por completo, los segmentos curvos y rectos que conforman el gancho comienzan a querer deslizarse en el conducto y, por lo tanto, estos segmentos de fibra se someten progresivamente a flexiones y deformaciones plásticas, lo que conduce a un aumento importante de la carga de pullout, hasta alcanzar la primera carga máxima (P_{G1}). Luego la carga de extracción cae a un cierto valor hasta que nuevamente los segmentos curvos y rectos del gancho se ven sometidos a nuevas deformaciones plásticas, pero ahora en sentidos contrarios, y la carga de extracción por pullout alcanza el segundo pico máximo (P_{G2}). Es claro que para las fibras con extremo con gancho el mecanismo que domina es el anclaje mecánico que ofrece el gancho.

- EFECTO MATRIZ: los valores de carga máxima por anclaje mecánico (P_{G1} y P_{G2}) son mayores para las mezclas de la matriz MH2 que para las de MH1. Además, estos puntos máximos son más pronunciados para las mezclas de MH2, siendo mayores las caídas de carga entre ellos lo cual permite visualizarlos en la curva carga-

desplazamiento con mayor claridad. En el caso de las mezclas de MH1, al ser una matriz menos resistente y menos compacta, la caída de carga entre ellos no es tan pronunciada, lo que se visualiza en curvas carga-desplazamiento más achatadas.

- EFECTO MICROFIBRA: no se observa una influencia clara para la matriz MH1, mientras que para la matriz MH2 ya fue comentado en el análisis general

d) Análisis de la fuerza de fricción entre F-M:

Una vez pasado la segunda carga máxima P_{G2} , la carga decrece gradualmente y luego se mantiene constante hasta el final. La fuerza de fricción es mayor para las mezclas de la matriz MH2 que para MH1. En cuanto a la influencia de la microfibra, se aplica lo indicado previamente.

e) Análisis de la energía de pullout:

De la misma forma, la energía de pullout es mayor para las mezclas de la matriz MH2 que para MH1. En cuanto a la influencia de la microfibra, se aplica lo indicado previamente.

Luego de realizado el ensayo de pullout, se midió la longitud final de las fibras arrancadas. En el caso de las fibras de acero con extremo recto, no hubo diferencia significativa entre la longitud inicial (L_i) y la longitud final (L_f) después del ensayo. Mientras que en las fibras de acero con extremo con gancho sí hubo un cambio en la longitud de la fibra antes y después del ensayo (entre L_i y L_f) debido al estiramiento del gancho que varió entre 0,4 y 0,7 mm. En la Figura 4-20 puede observarse que al arrancar las fibras con extremo con gancho embebidas en la matriz MH2 el gancho se estiró completamente, mientras que aquellas embebidas en la matriz MH1 el gancho se estiró parcialmente, lo cual es razonable en base a las conclusiones señaladas previamente.



Figura 4-20. Estiramiento diferencial del gancho de las fibras arrancadas de la matriz MH1 y MH2

En la Figura 4-21 se grafica en forma conjunta las curvas carga-desplazamiento (hasta un desplazamiento de 0,6mm) para las fibras con extremo recto y con gancho. Se puede observar que el comportamiento de pullout de ambas fibras es similar en las etapas iniciales.

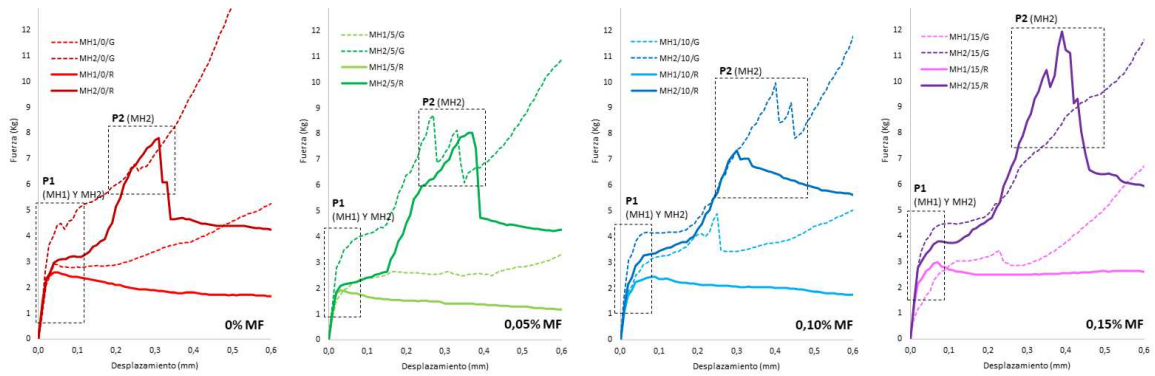


Figura 4-21. Comparativa del comportamiento de pullout de fibras con extremo recto y con gancho, para el dispositivo 1

4.2.1.2 Resultados del ensayo de pullout para la configuración de un grupo de 16 fibras (Dispositivo D2)

A continuación, se presentan las curvas carga-desplazamiento obtenidas del ensayo de pullout del dispositivo D2 con fibras de acero con extremos rectos para las mezclas MH1 y MH2 y con los diferentes porcentajes de microfibra polimérica de 0% (Figuras 4-22 y 4-23), 0,05% (Figuras 4-24 y 4-25), 0,10% (Figuras 4-26 y 4-27) y 0,15% (Figuras 4-28 y 4-29), respectivamente. Para cada una de ellas, se presenta la curva completa hasta los 15mm de desplazamiento y se señala la carga máxima alcanzada correspondiente a la adherencia química (P_1).

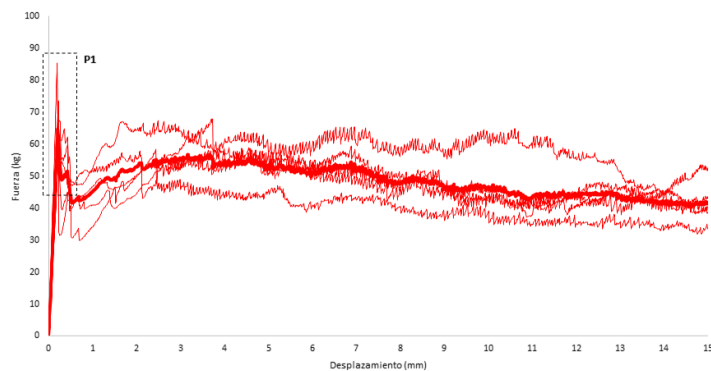


Figura 4-22. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/0/R

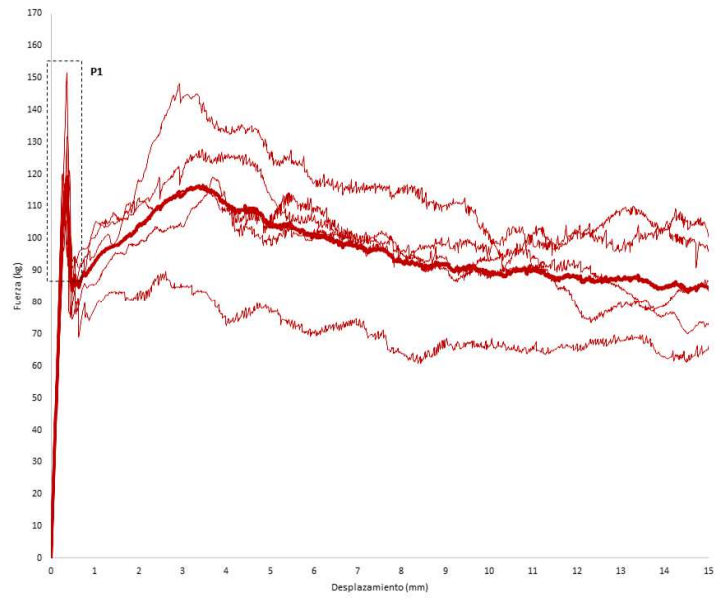


Figura 4-23. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/0/R

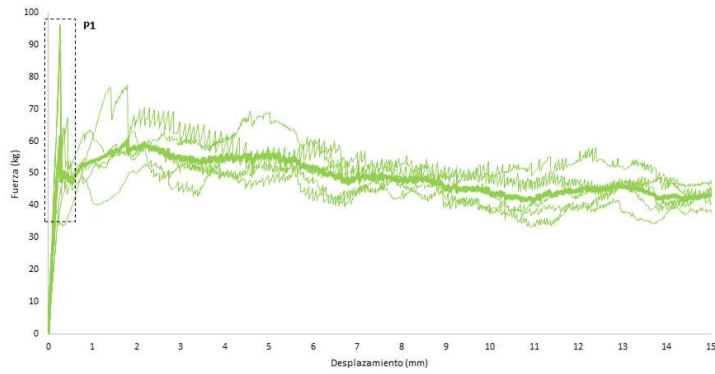


Figura 4-24. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/5/R

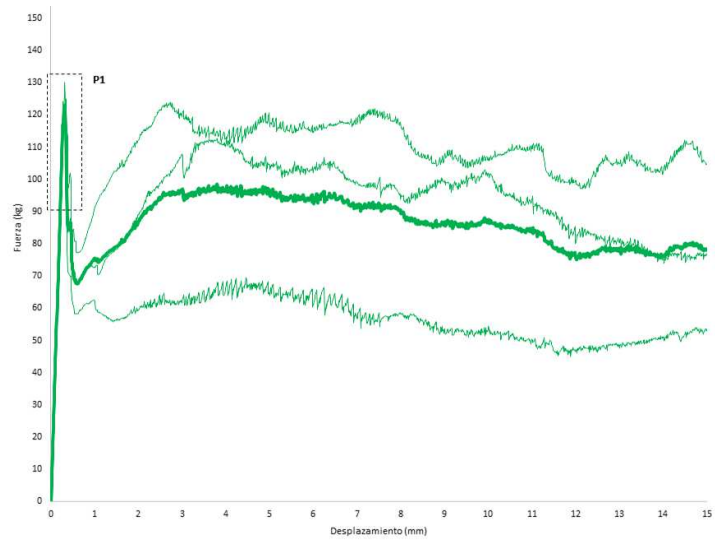


Figura 4-25. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/5/R

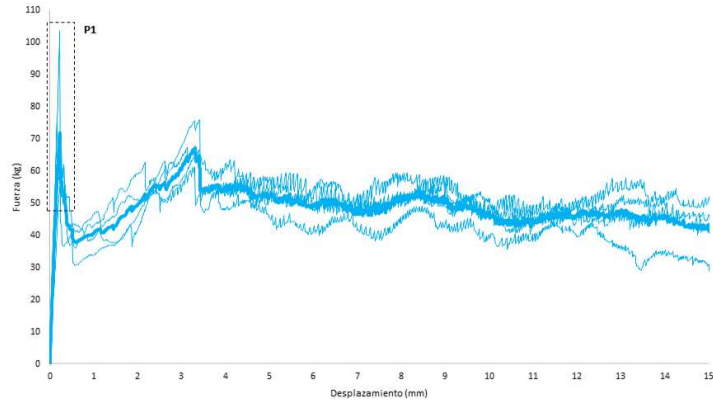


Figura 4-26. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/10/R

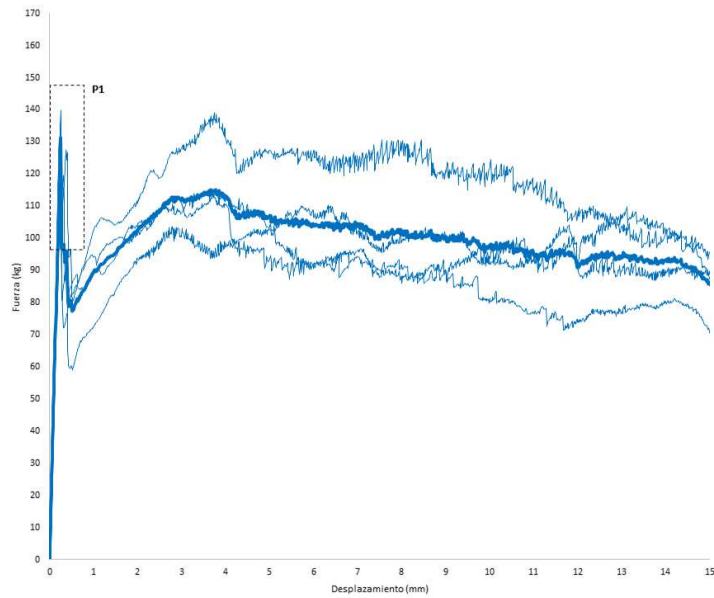


Figura 4-27. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/10/R

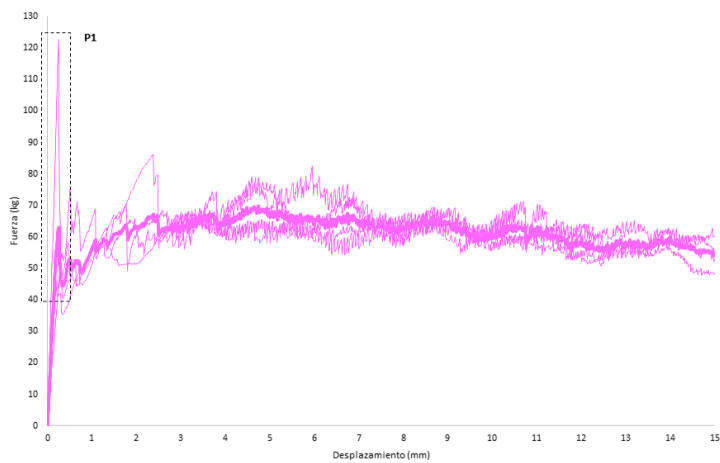


Figura 4-28. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/15/R

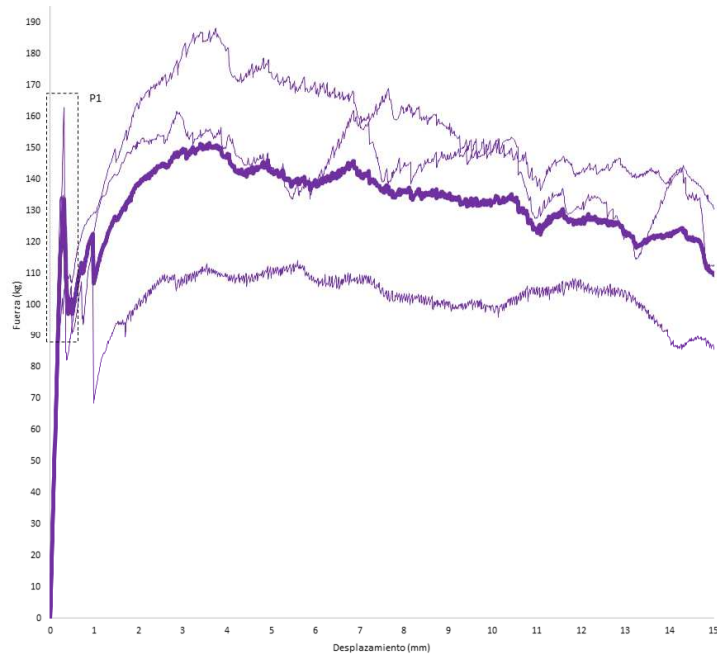


Figura 4-29. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/15/R

A modo de resumen, en la Figura 4-30 se presentan las curvas promedio carga-desplazamiento obtenidas del ensayo de pullout del dispositivo D2 con fibras de acero con extremos rectos, para las mezclas MH1 y MH2 con los diferentes porcentajes de microfibra polimérica (0%, 0,05%, 0,10%, 0,15%). Puede observarse que el comportamiento general es similar a los resultados obtenidos para los ensayos de la fibra con extremo recto ensayada en forma aislada (D1), pero con algunas diferencias. Se identifica un tramo inicial lineal donde la adherencia química presente en la interfaz F-M predomina, luego se alcanza una carga máxima P_1 , y le sigue una caída de la carga y de allí hacia adelante predomina la fuerza de fricción entre la fibra y el conducto conformado por la matriz. Una primera diferencia, es que para ambas matrices se alcanza una única carga máxima de adherencia química (P_1), no se distingue para la matriz MH2 la segunda carga máxima (P_2) que se observó para la fibra aislada. Una segunda diferencia en el comportamiento, es que a partir del valor de P_1 la carga cae en forma abrupta y luego aumenta hasta cierto valor, a partir de allí permanece prácticamente constante hasta el final del ensayo. Incluso para algunas mezclas ese valor llega a superar el pico de carga P_1 . Este comportamiento difiere del observado para la fibra recta ensayada en forma aislada, ya que después de la caída abrupta de la carga hasta cierto valor, ésta no aumentaba, sino que sólo permanecía constante a partir de ese valor.

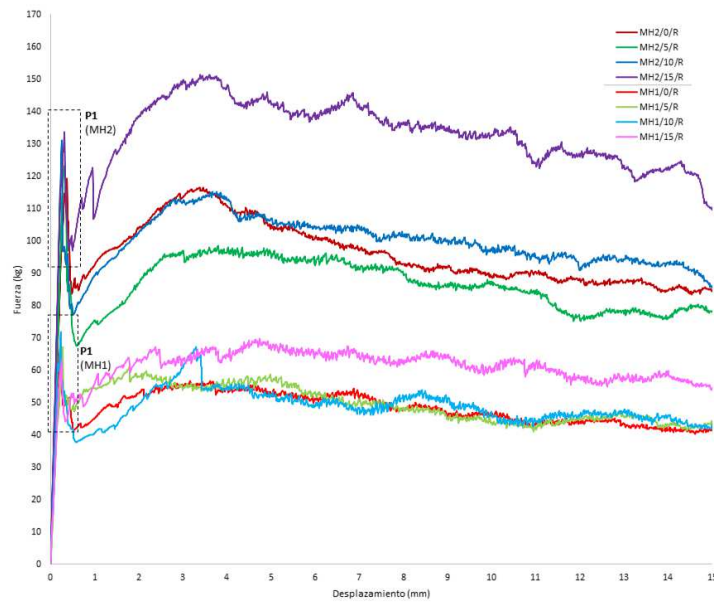


Figura 4-30. Curvas carga-desplazamiento promedio con la configuración del dispositivo D2 con fibras de acero con extremos rectos

A continuación, se describen las etapas del comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras con extremo recto. Para esta configuración de ensayo, Simões et al. (2017) identifican dos etapas: una primera etapa donde la carga aumenta linealmente hasta alcanzar una carga máxima correspondiente a la **fuerza de adherencia** de la interfaz F-M, seguida por una segunda etapa donde la carga comienza a descender que corresponde a la **fuerza por fricción** que se produce entre la fibra y la matriz. Analizándolo en forma conjunta con las etapas planteadas por Deng et al. (2018) en relación al comportamiento de una fibra aislada, se puede observar que en líneas generales el comportamiento es análogo. En la Figura 4-31 se identifican y describen las etapas del comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras, contemplando las etapas señaladas en ambos trabajos (Simões et al., 2017; Deng et al., 2018), mientras que en la Figura 4-32 se muestran dichas etapas gráficamente.

| | MH1 | MH2 |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Etapa 1 | ETAPA TOTALMENTE UNIDA: prevalece la adherencia química entre F-M | |
| Etapa 2 | ETAPA DE DESPRENDIMIENTO: LA INTERFAZ F-M SE DAÑA PARCIALMENTE La carga llega a un valor máximo (P_1) correspondiente al pico de adherencia química en la interfaz F-M, y a partir de este punto la carga comienza a disminuir porque la interfaz F-M se daña parcialmente (pérdida de adherencia química) y en forma conjunta comienza a actuar la fuerza de fricción entre la fibra y la matriz | |
| Etapa 3 | ETAPA DE DESLIZAMIENTO POR FRICCIÓN: ocurre el desprendimiento total entre F-M y actúa solamente la fuerza de fricción entre ambas. | |

Figura 4-31. Etapas del comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras con extremo recto

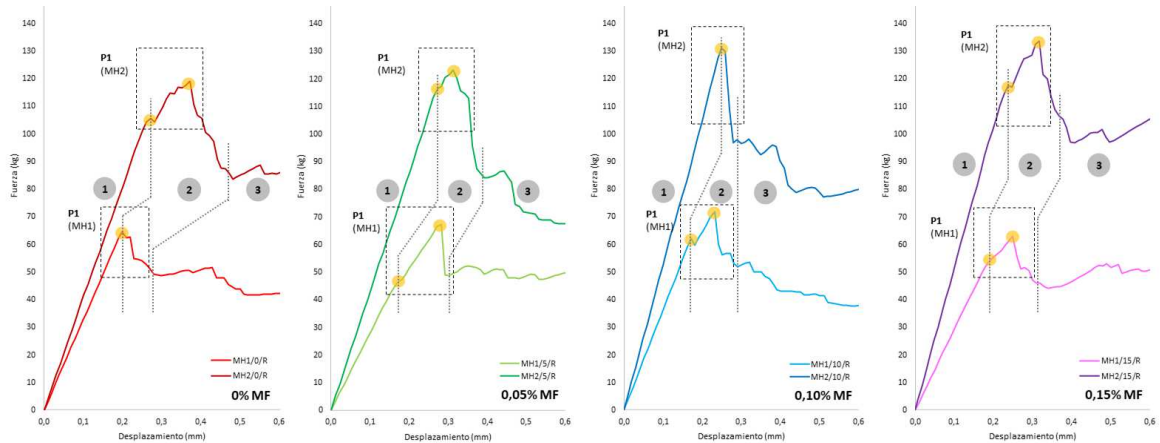


Figura 4-32. Etapas del comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras de acero con extremo recto, según el tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibras poliméricas

En base a los resultados obtenidos de las curvas carga-desplazamiento del dispositivo D2, para cada uno de los especímenes ensayados se identificaron los siguientes valores de cargas máximas y energía de pullout, y a partir de ellos se determinaron los valores promedio de:

- P_1 : primera carga máxima correspondiente a la adherencia química (en MH1 y MH2), en (kg), que corresponde a la carga pico alcanzada entre 0 - 0,5 mm de desplazamiento;
- E_p : energía de pullout en los desplazamientos 0,5mm, 1,5mm y 15mm, en (kg.m).

En la Figura 4-33 se expresa mediante diagramas de barras, los valores promedio para la carga máxima de adherencia química (P_1), para las fibras de acero con extremo recto. Mientras que en las Figuras 4-34a, 4-34b y 4-34c se grafican los valores promedio de energía de pullout hasta desplazamientos de 0,5 mm ($EP_{(0,5mm)}$), 1,5 mm ($EP_{(1,5mm)}$), y 15 mm ($EP_{(15mm)}$), respectivamente. Asimismo, se indican los porcentajes de aumento o disminución de los valores tomando como 100% el valor de la matriz de referencia (sin microfibras), para cada tipo de matriz (MH1 y MH2).

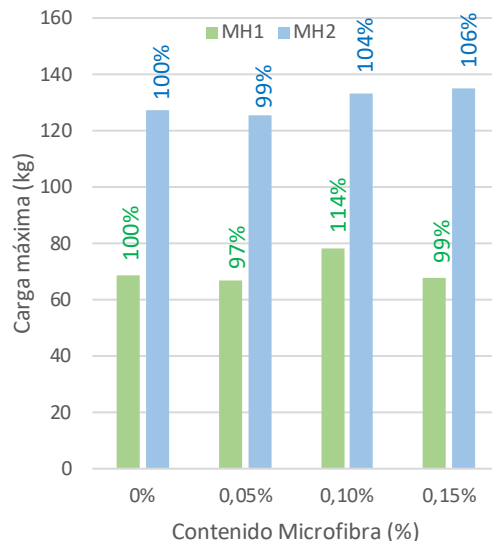


Figura 4-33. Carga máxima de adherencia (P_1) para conjunto de 16 fibras de acero con extremos rectos

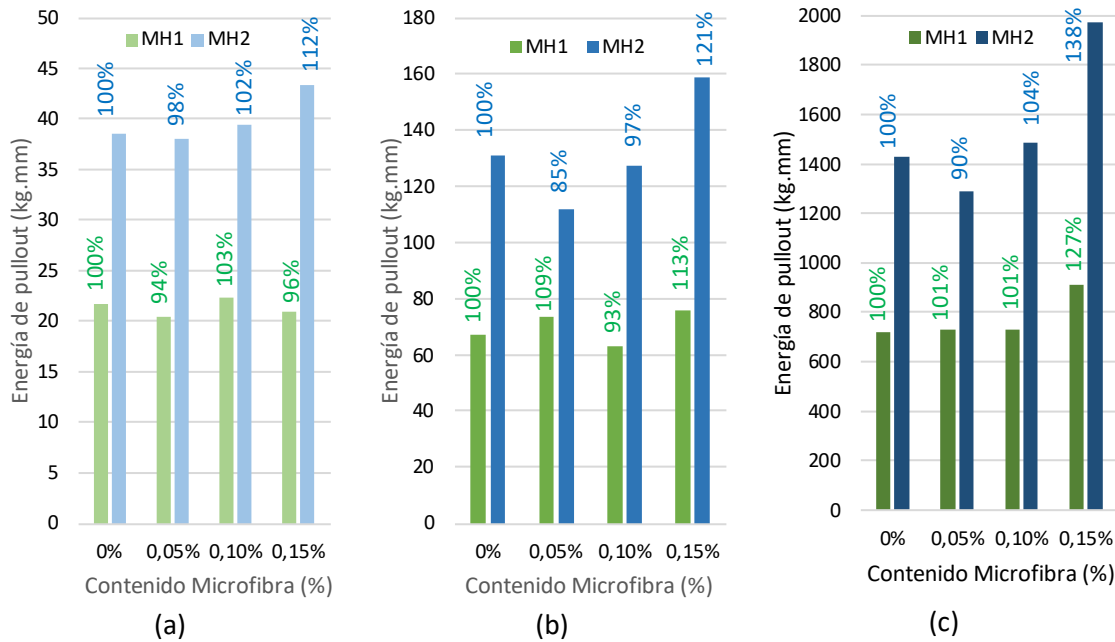


Figura 4-34. Energía de pullout para conjunto de 16 fibras de acero con extremos rectos hasta desplazamientos de: (a) 0,5mm; (b) 1,5mm; (c) 15mm.

En base a los resultados obtenidos, se realiza un análisis general y de cada uno de los mecanismos involucrados en el comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras de acero con extremos rectos:

a) Análisis general:

- EFECTO MATRIZ: observando las Figuras 4-30, 4-32, 4-33 y 4-34, se puede ver que las mezclas de MH2 presentan resultados mejores frente a las mezclas MH1, en cuanto a los siguientes parámetros: pendiente del tramo lineal de la curva carga-desplazamiento (adherencia química de la interfaz F-M), carga máxima de adherencia química (P_1), fuerza de fricción y energía de pullout (E_p).
- EFECTO MICROFIBRA: observando las Figuras 4-30, 4-32, 4-33 y 4-34, en general, para la matriz MH2 la presencia de 0,15% de microfibra polimérica tiene una incidencia mayor en los parámetros (P_1 , fuerza de fricción y energía de pullout). Mientras que para las mezclas de la matriz MH1 no hay una incidencia muy clara.

b) Análisis del mecanismo de adherencia química de la interfaz F-M:

Analizando las pendientes del tramo lineal de las curvas carga-desplazamiento (Figura 4-30), se observa que las matrices MH2 presentan pendientes más pronunciadas que las mezclas de la matriz MH1.

Por otro lado, como fue mencionado previamente, para ambas matrices se alcanza una única carga máxima de adherencia química (P_1), no distinguiéndose la segunda carga máxima (P_2) que si se observó para la fibra aislada. En cuanto al efecto de la matriz, los valores de P_1 de la matriz MH2 son mayores que los de MH1.

En lo que refiere al contenido de microfibra, se observa que para el contenido de 0,15% los valores de P_1 y E_p son mayores en relación a la referencia (0%MF) para la matriz MH2, mientras que para la matriz MH1 no hay una incidencia muy clara.

c) Análisis de la fuerza de fricción entre F-M:

En cuanto a la fuerza de fricción, los valores correspondientes a las mezclas de MH2 son mayores que para MH1. El contenido de 0,15% de microfibra tiene una influencia más evidente en ambas mezclas, mientras que para el resto de los contenidos no.

Como fue mencionado, a partir del valor de P_1 la carga cae en forma abrupta y luego aumenta hasta cierto valor, a partir de allí permanece prácticamente constante hasta el final del ensayo. Incluso para algunas mezclas ese valor llega a superar el pico de carga P_1 , como es el caso de MH2/15. Este comportamiento difiere claramente del observado para la fibra recta ensayada en forma aislada, ya que después de la caída abrupta de la carga ésta no aumentaba y a partir de allí permanecía constante hasta el final del ensayo.

d) Análisis de la energía de pullout:

Los valores de energía de pullout son mayores para las mezclas de la matriz MH2 que para MH1. En cuanto a la influencia de la microfibras, El contenido de 0,15% de microfibras tiene una influencia más evidente en ambas mezclas, mientras que para el resto de los contenidos no (en comparación con la referencia).

Por otra parte, se presentan a continuación las curvas carga-desplazamiento obtenidas del ensayo de pullout del dispositivo D2 (conjunto de 16 fibras) pero ahora con fibras de acero con extremos con gancho para las mezclas MH1 y MH2 y con los diferentes porcentajes de microfibras polimérica de 0% (Figuras 4-35 y 4-36), 0,05% (Figura 4-37), 0,10% (Figuras 4-38 y 4-39) y 0,15% (Figuras 4-40 y 4-41), respectivamente. Para cada una de ellas, se presenta la curva completa hasta los 15mm de desplazamiento y se señalan las cargas máximas alcanzadas: (P_1) carga máxima de adherencia química; primera (P_{G1}) y segunda (P_{G2}) carga máxima provocada por el anclaje mecánico del gancho.

Cabe observar que para las mezclas con matriz MH2, en la mayoría de las probetas ensayadas, no se pudo completar el ensayo porque se superó la capacidad de la prensa antes de llegar a la carga pico provocada por el anclaje mecánico del gancho (P_{G1}). Sin embargo, se puede observar el comportamiento del conjunto de fibras al arranque y en el tramo lineal del gráfico, e intuir en forma genérica el comportamiento que hubieran tenido esas curvas en base a algunos resultados aislados que sí pudieron completarse.

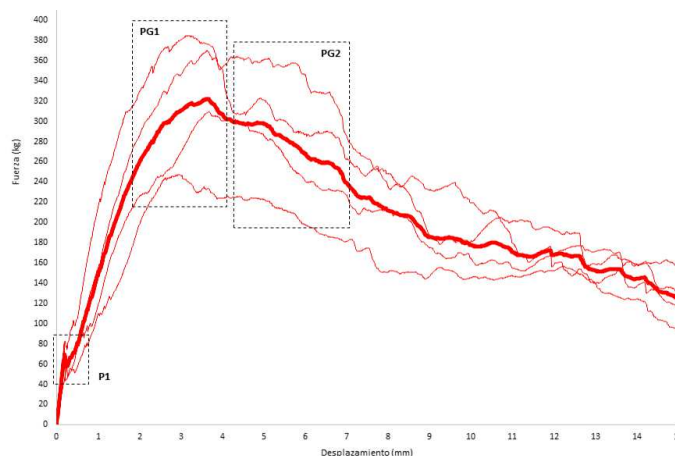


Figura 4-35. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/0/G

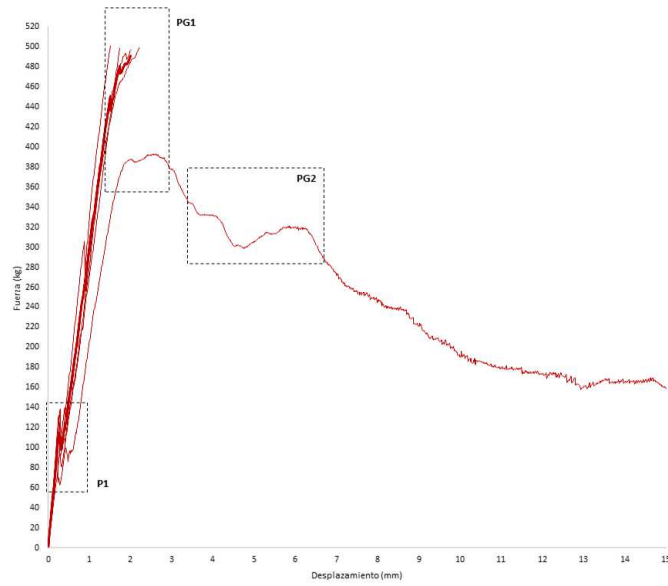


Figura 4-36. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/0/G

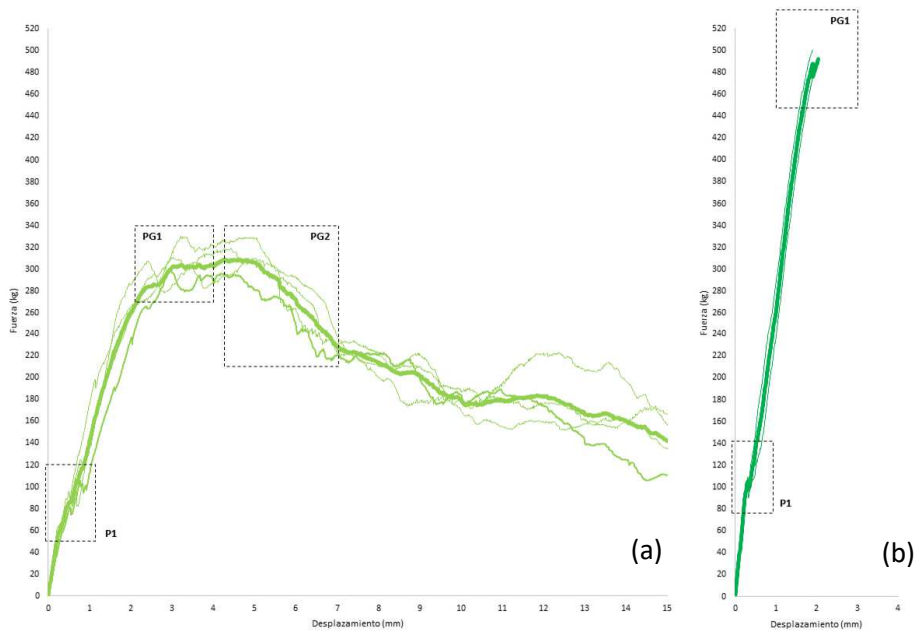


Figura 4-37. Curvas carga-desplazamiento de D2 para (a) MH1/5/G y (b) MH2/5/G

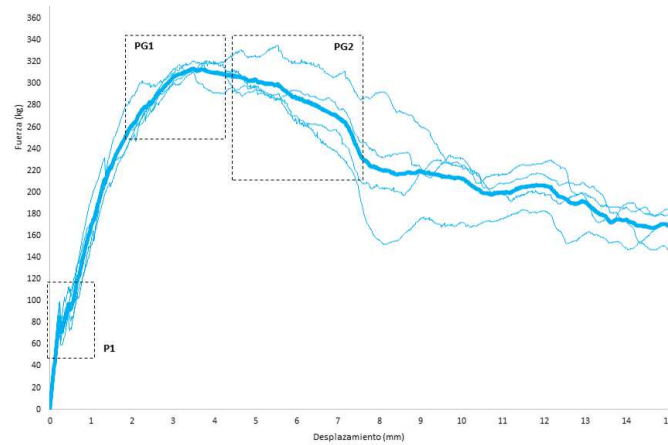


Figura 4-38. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/10/G

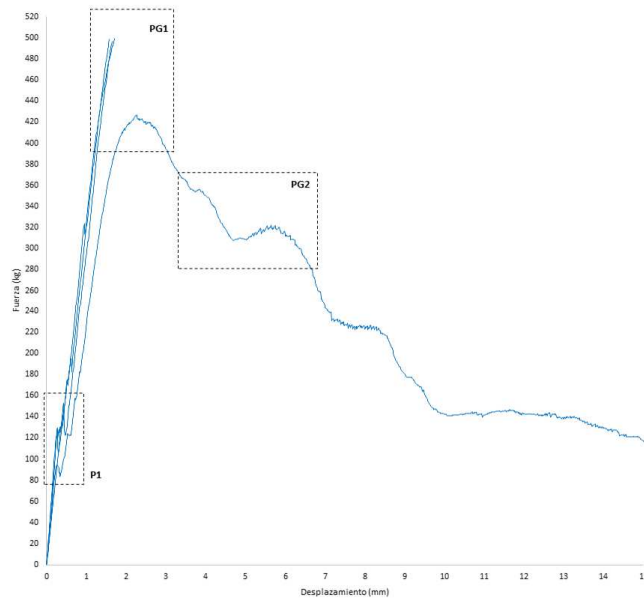


Figura 4-39. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/10/G

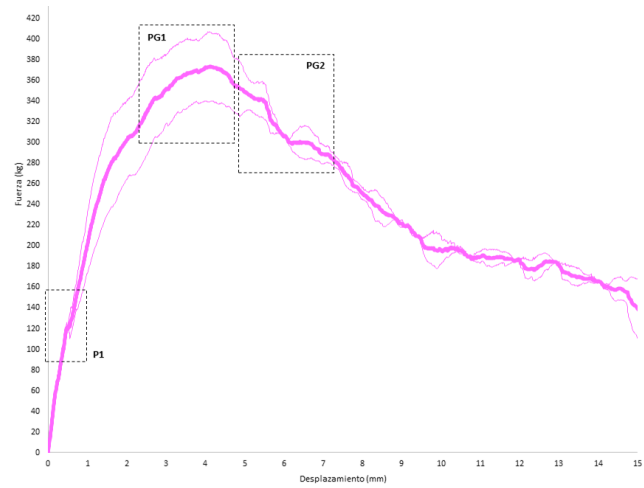


Figura 4-40. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH1/15/G

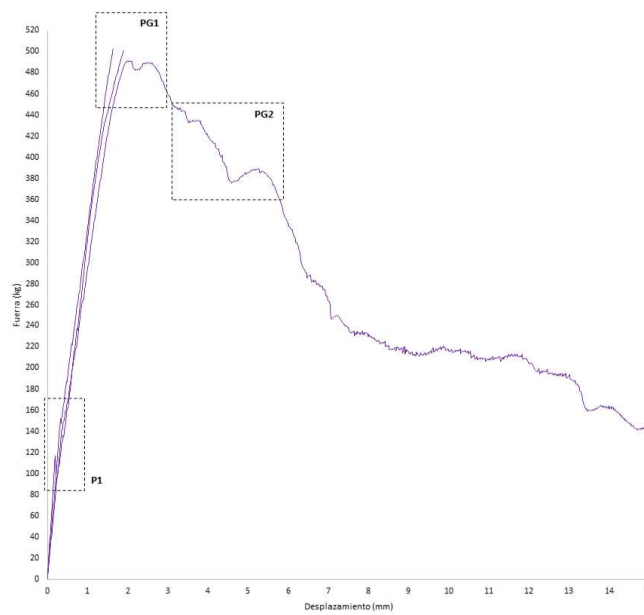


Figura 4-41. Curvas carga-desplazamiento de D2 para MH2/15/G

A modo de resumen, en la Figura 4-42 se presentan las curvas carga-desplazamiento promedio obtenidas del ensayo de pullout del dispositivo D2 con 16 fibras de acero con extremos con gancho, para las mezclas MH1 y MH2 con los diferentes porcentajes de microfibra polimérica (0%, 0,05%, 0,10%, 0,15%). El comportamiento general es similar a los resultados obtenidos para los ensayos de la fibra con extremo con gancho ensayada en forma aislada (D1). Se identifica un tramo inicial lineal donde la adherencia química presente en la interfaz F-M predomina hasta alcanzar una carga máxima P_1 , luego le sigue una caída de la carga y a partir de allí la carga empieza a aumentar nuevamente en forma lineal, seguido por un tramo no lineal hasta alcanzar la primera carga máxima provocada por el anclaje mecánico del gancho (P_{G1}). Posteriormente la carga comienza a descender y se produce una segunda carga máxima por el anclaje mecánico del gancho (P_{G2}). A partir de allí la carga va descendiendo en forma gradual, predomina la fuerza de fricción entre la fibra y el conducto conformado por la matriz.

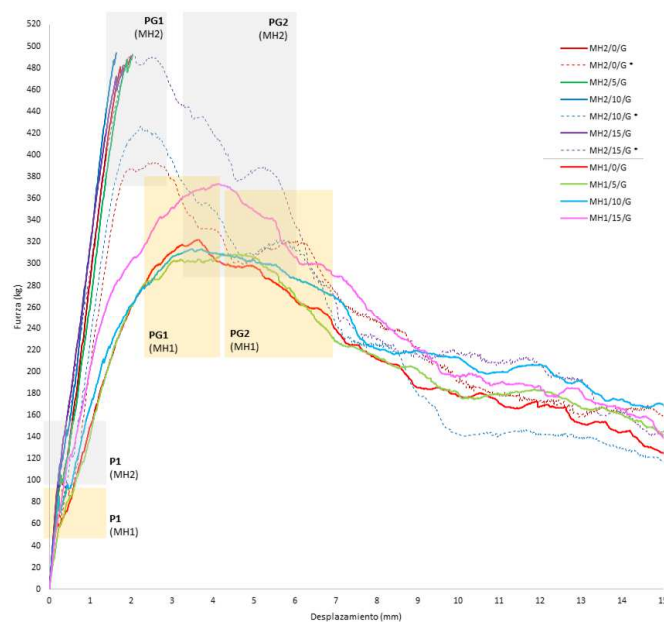


Figura 4-42. Curvas carga-desplazamiento promedio con la configuración del dispositivo D2 con fibras de acero con extremos con gancho

En las curvas carga-desplazamiento se puede observar que se repiten las mismas 5 etapas del comportamiento de extracción por pullout de la fibra aislada. A continuación, se describen brevemente dichas etapas en base a los trabajos de (Simões et al., 2017; Deng et al., 2018) y se muestran gráficamente en la Figura 4-43:

- (1) Etapa elástica y de desprendimiento parcial: prevalece la fuerza de adhesión química presente en la interfaz F-M y se alcanza una carga máxima P_1 ;
- (2) Primera etapa de deformación plástica: el gancho es sometido a flexiones y deformaciones plásticas a medida que quiere avanzar por el conducto, la carga de pullout aumenta sustancialmente y se alcanza una primera carga máxima por anclaje mecánico (P_{G1});
- (3) Segunda etapa de deformación plástica: la carga de extracción cae a un cierto valor hasta que nuevamente los segmentos curvos y rectos del gancho se ven sometidos a nuevas deformaciones plásticas, y la carga de extracción por pullout alcanza la segunda carga máxima por anclaje mecánico (P_{G2});

- (4) Etapa híbrida deformación-deslizamiento: la resistencia que se opone a la extracción se compone de la fricción a lo largo del conducto y la deformación plástica decreciente;
- (5) Etapa de deslizamiento por fricción.

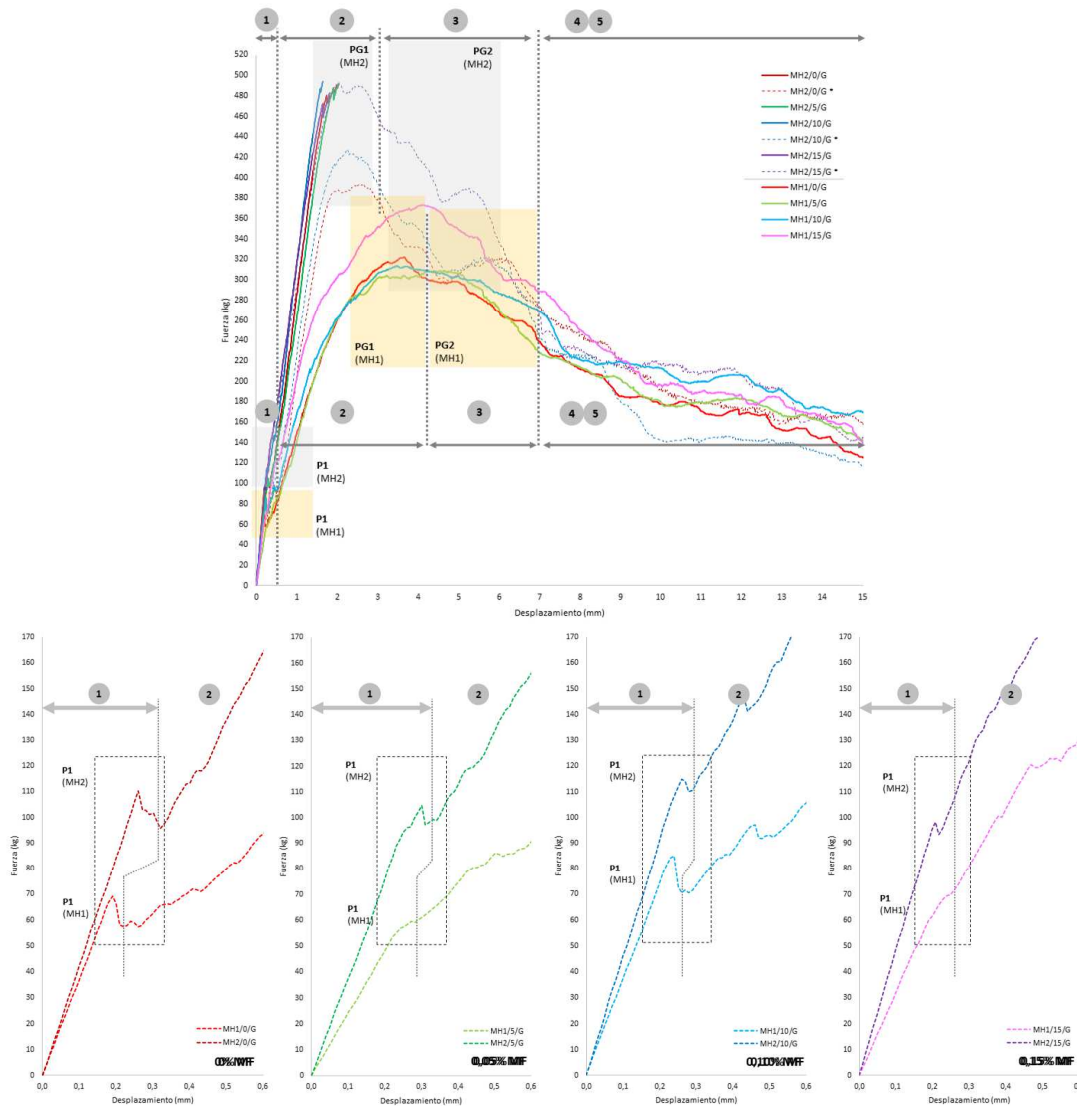


Figura 4-43. Etapas del comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras de acero con extremo con gancho, según el tipo de matriz (MH1 y MH2) y el porcentaje de microfibras polimérica

En base a los resultados obtenidos de las curvas carga-desplazamiento del dispositivo D2, para cada uno de los especímenes ensayados se identificaron los siguientes valores de cargas máximas y energía de pullout, y a partir de ellos se determinaron los valores promedio de:

- P_1 : primera carga máxima correspondiente a la adherencia química (en MH1 y MH2), en (kg), que corresponde a la carga pico alcanzada entre 0 – 0,5 mm de desplazamiento;
- P_{G1} : primera carga máxima provocada por el anclaje mecánico del gancho, en (kg), que corresponde a la carga pico alcanzada entre 0,5 - 5 mm de desplazamiento;
- E_p : energía de pullout en los desplazamientos 0,5mm, 1,5mm y 15mm, en (kg.m). En particular para el caso de la matriz MH2 y fibras de acero con extremos con gancho, no se pudo determinar la energía de pullout hasta el desplazamiento de 15mm, por lo motivos ya explicados previamente.

En las Figuras 4-44a y 4-44b se expresan mediante diagramas de barras, los valores promedio para las cargas máximas de adherencia química (P_1) y de anclaje mecánico (P_{G1}) respectivamente, para las fibras de acero con extremo con gancho. Mientras que en las Figuras 4-45a, 4-45b y 4-45c se grafican los valores promedio de energía de pullout hasta desplazamientos de 0,5 mm ($EP_{(0,5mm)}$), 1,5 mm ($EP_{(1,5mm)}$) y 15 mm ($EP_{(15mm)}$), respectivamente. Asimismo, se indican los porcentajes de aumento o disminución de los valores tomando como 100% el valor de la matriz de referencia (sin microfibras), para cada tipo de matriz (MH1 y MH2).

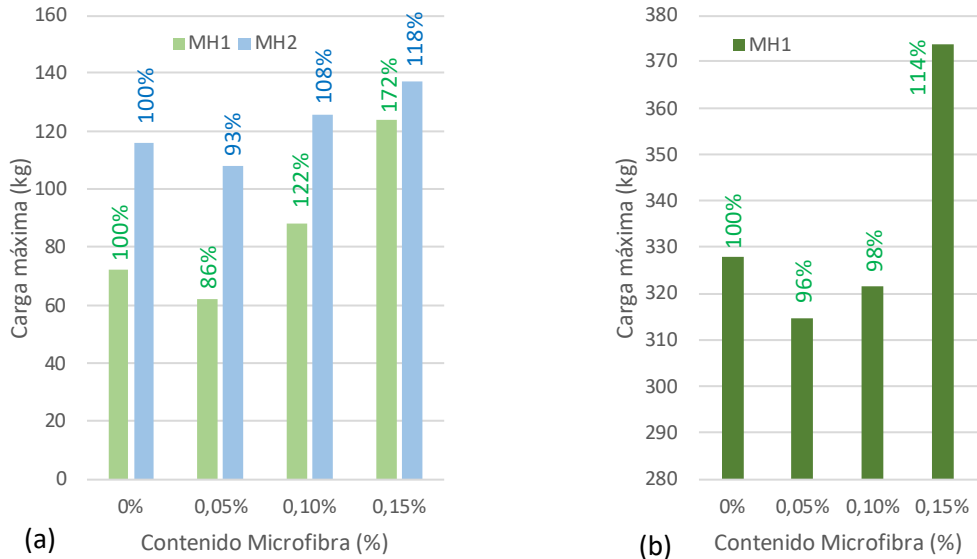


Figura 4-44. Cargas máximas de adherencia química (P_1) y anclaje mecánico (P_{G1}) para conjunto de 16 fibras de acero con extremos con ganchos

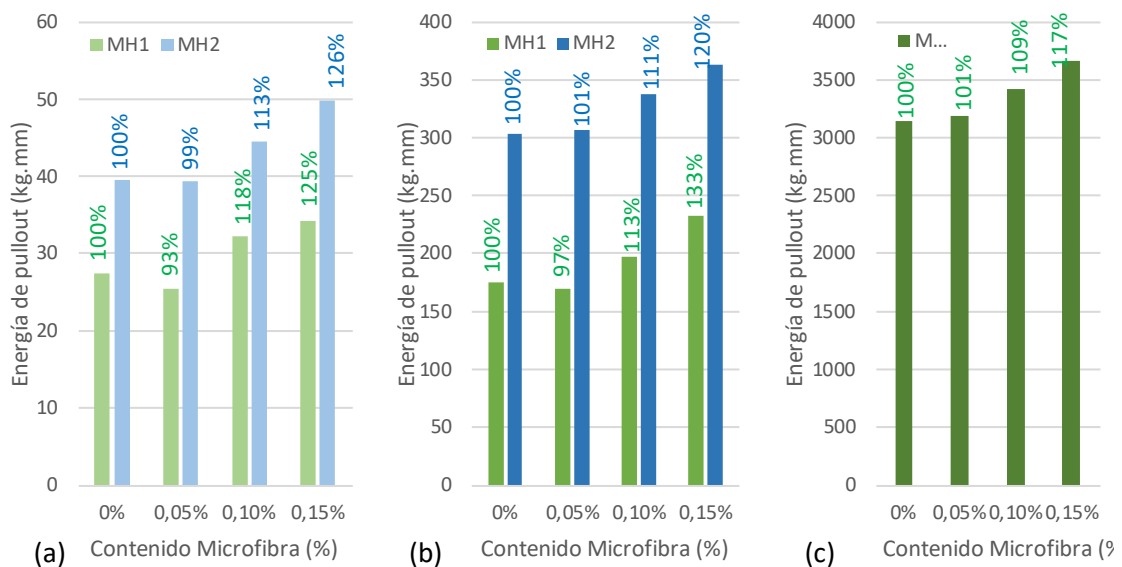


Figura 4-45. Energía de pullout para conjunto de 16 fibras de acero con extremos con ganchos hasta desplazamientos de: (a) 0,5mm; (b) 1,5mm; (c) 15mm

En base a los resultados obtenidos, se realiza un análisis general y de cada uno de los mecanismos involucrados en el comportamiento de extracción por pullout de un conjunto de 16 fibras de acero con extremos con ganchos. Como fuera mencionado previamente, para las mezclas con matriz MH2, en la mayoría de las probetas ensayadas, no se pudo completar el ensayo porque se superó la capacidad de la prensa antes de llegar a la carga pico provocada por

el anclaje mecánico del gancho (P_{G1}), pero sí se pudieron completar algunos ensayos aislados que permiten visualizar que el comportamiento general es similar al del dispositivo D1.

Para ambas matrices se alcanza una única carga máxima de adherencia química (P_1), no distinguiéndose la segunda carga máxima (P_2) que sí se observó para la fibra aislada.

Al igual que en el dispositivo D1, después de que la fibra se despegó por completo, los segmentos curvos y rectos que conforman el gancho comienzan a querer deslizarse en el conducto y, por lo tanto, estos segmentos de fibra se someten progresivamente a flexiones y deformaciones plásticas, lo que conduce a un aumento importante de la carga de pullout, hasta alcanzar la primera carga máxima por anclaje mecánico (P_{G1}). Luego la carga de extracción cae a un cierto valor hasta que nuevamente los segmentos curvos y rectos del gancho se ven sometidos a nuevas deformaciones plásticas, pero ahora en sentidos contrarios, y la carga de extracción por pullout alcanza el segundo pico máximo (P_{G2}). Estos puntos máximos (P_{G1} y P_{G2}) son más pronunciados para las mezclas de MH2, siendo mayores las caídas de carga entre ellos lo cual permite visualizarlos en la curva carga-desplazamiento más claramente. En el caso de las mezclas de MH1, al ser una matriz menos resistente y menos compacta, la caída de carga entre ellos no es tan pronunciada, lo que se visualiza en curvas carga-desplazamiento más achatadas

- EFECTO MATRIZ: en base a ello, se puede observar que las mezclas de MH2 presentan mejores resultados frente a las mezclas MH1, en cuanto a las cargas máximas de adherencia química (P_1) y energía de pullout (E_p) para los desplazamientos de 0,5mm y 1,5mm. En cuanto a los demás parámetros se puede intuir, en base a los resultados aislados que sí pudieron completarse, que las mezclas MH2 también presentarían mejores resultados en lo que refiere a las cargas máximas correspondientes al anclaje mecánico (P_{G1} y P_{G2}), fuerza de fricción y energía de pullout (E_p) para desplazamientos mayores.
- EFECTO MICROFIBRA: observando las Figuras 4-42 a 4-45, en general, para ambas matrices (MH1 y MH2) hay una tendencia creciente que los diferentes parámetros analizados van aumentando a medida que aumenta el contenido de microfibra polimérica (sobre todo para 0,10% y 0,15%).

En la Figura 4-46 se grafica en forma conjunta las curvas carga-desplazamiento (hasta un desplazamiento de 0,6mm) para las fibras con extremo recto y con gancho. Se puede observar que el comportamiento de pullout de ambos tipos de fibras (extremos rectos o con ganchos) es similar en las etapas iniciales, para cada tipo de matriz (MH1 y MH2).

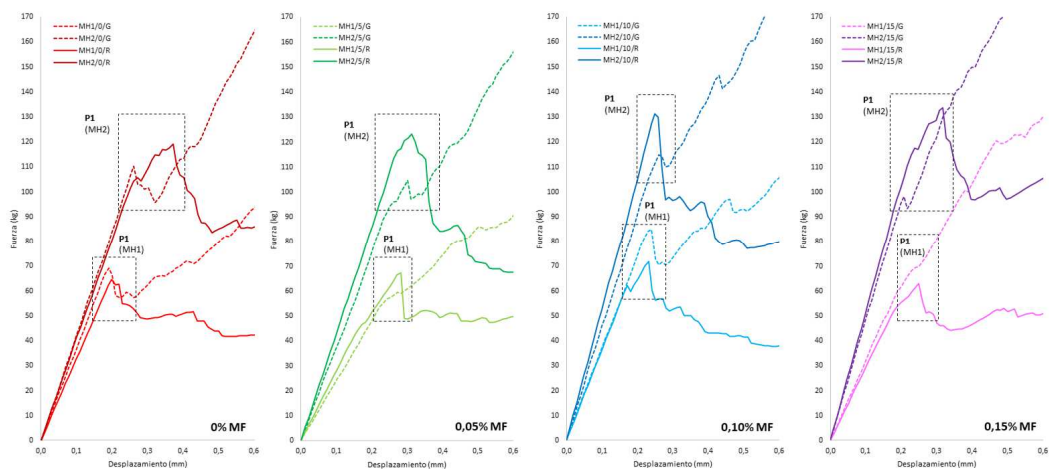


Figura 4-46. Comparativa del comportamiento de pullout de fibras con extremo recto y con gancho (D2)

4.2.2 Análisis a escala microestructural: MEB

Se analizó la microestructura de la interfaz F-M, a través de la observación de imágenes MEB de la superficie de fibras de acero y muestras de matriz obtenidas después de realizar el ensayo de pullout de las probetas con una única fibra de acero con extremo recto (dispositivo 1). En particular, las muestras de la matriz corresponden a la zona del surco que deja la fibra al ser arrancada y se analizaron dos zonas que corresponden al valle del surco y al borde del surco, según lo detallado en el Capítulo 3. En el Anexo 1 se presentan fichas con la totalidad de imágenes MEB tomadas tanto de las muestras de cada matriz, así como de las correspondientes fibras arrancadas.

A continuación, se presenta un resumen del estudio microscópico realizado, por un lado, sobre la superficie de las fibras de acero con extremo recto que fueron arrancadas por pullout y, por otro, del surco dejado por la fibra en la matriz.

En las Figuras 4-47, 4-48, 4-49 y 4-50 se presentan imágenes MEB de la superficie de las fibras de acero arrancadas de las matrices MH1/0/R, MH1/5/R, MH1/10/R y MH1/15/R respectivamente. En general, sobre la superficie de la fibra arrancada se identifican claramente dos zonas diferentes, por un lado, restos de matriz adherida a la superficie de la fibra con un aspecto rugoso (Figuras: 4-47 b y c; 4-48 b y e; 4-49 b y c; 4-50c) y, por otro, la superficie del acero "limpia" sin matriz adherida con un aspecto liso (Figuras: 4-48b; 4-49e; 4-50e).

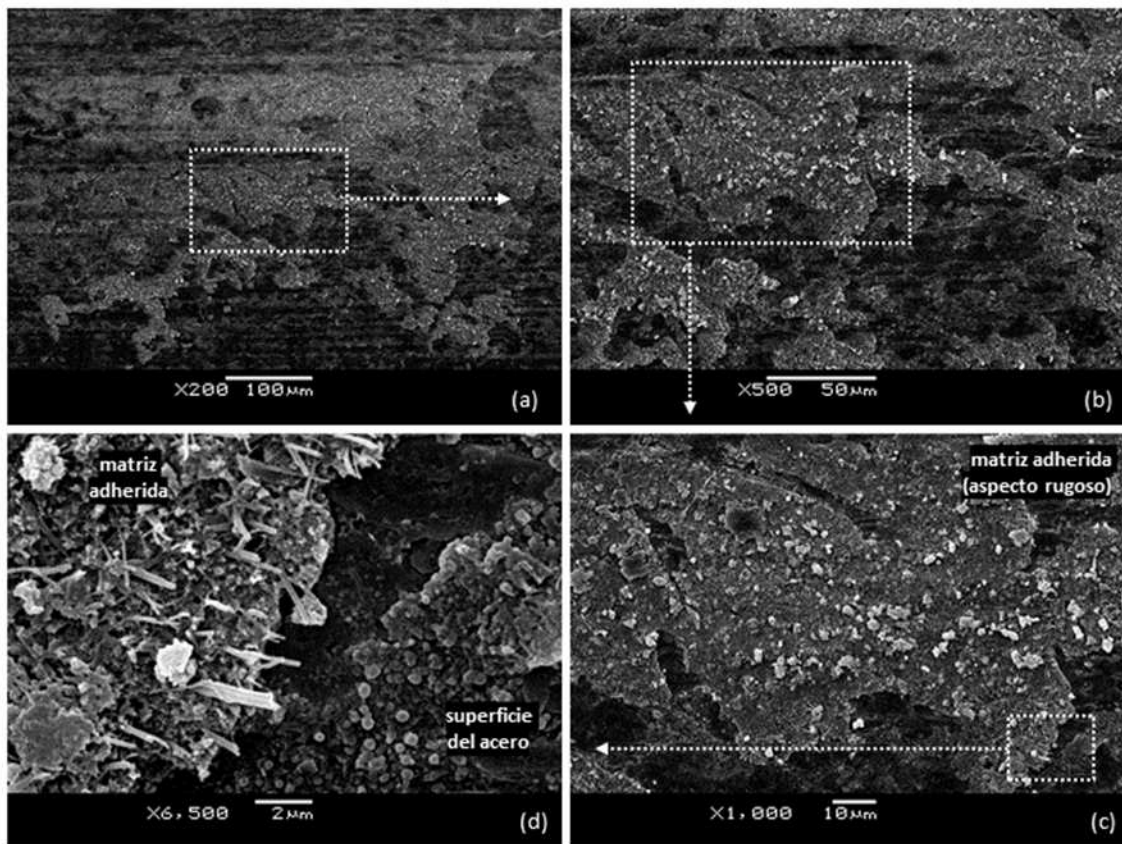


Figura 4-47. Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH1/0/R

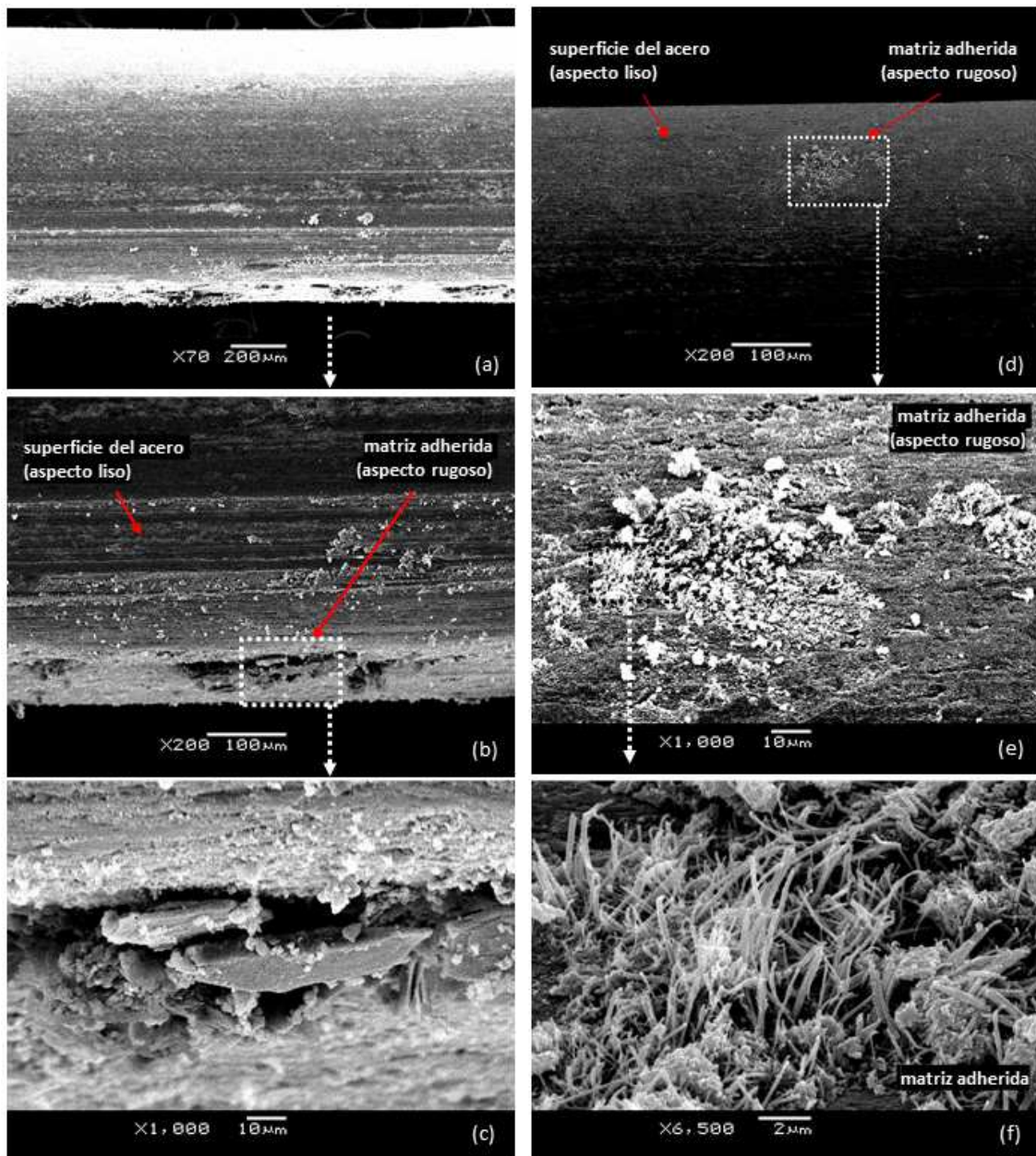


Figura 4-48. Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH1/5/R

Las imágenes MEB (Figuras: 4-48b; 4-49e; 4-50e) donde se observa la zona de la superficie de la fibra de acero “limpia” (sin matriz adherida) son similares a las presentadas en el apartado 3.2.5 del Capítulo 3, donde se apreciaban zonas con diferentes topografías (surcos, irregularidades, sectores más uniformes).

Por otra parte, en la zona donde la matriz quedó adherida a la superficie de la fibra de acero, se observa la presencia de productos de hidratación del cemento que se reconocen por su morfología y aspecto, como ser: cristales en forma de agujas cortas y sectores de material compacto que corresponden al silicato de calcio hidratado CSH (Figuras: 4-47d; 4-48f; 4-49d; 4-50d), y cristales en forma de grandes placas hexagonales que corresponden al hidróxido de calcio CH (Figuras: 4-48c; 4-49d).

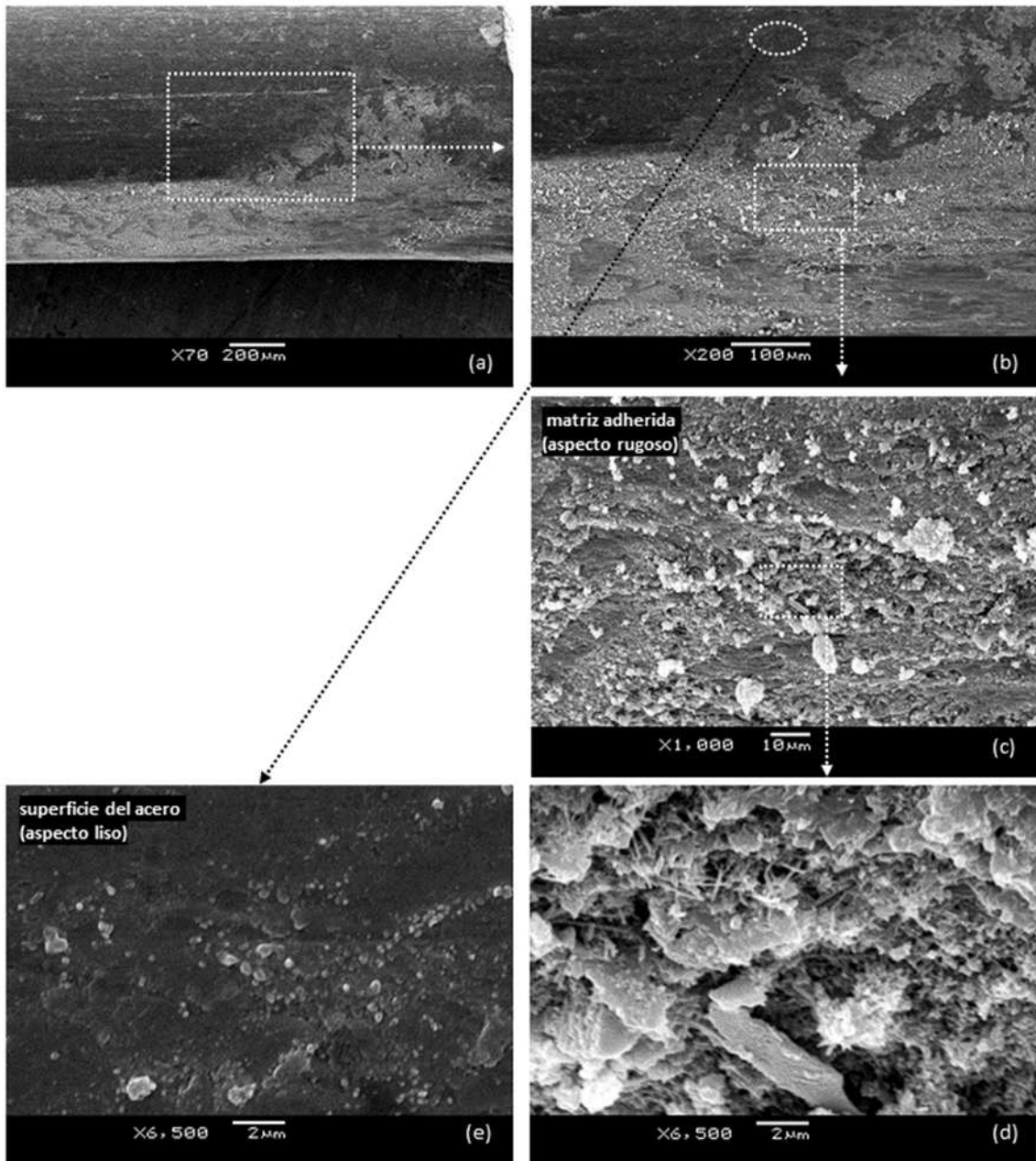


Figura 4-49. Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH1/10/R

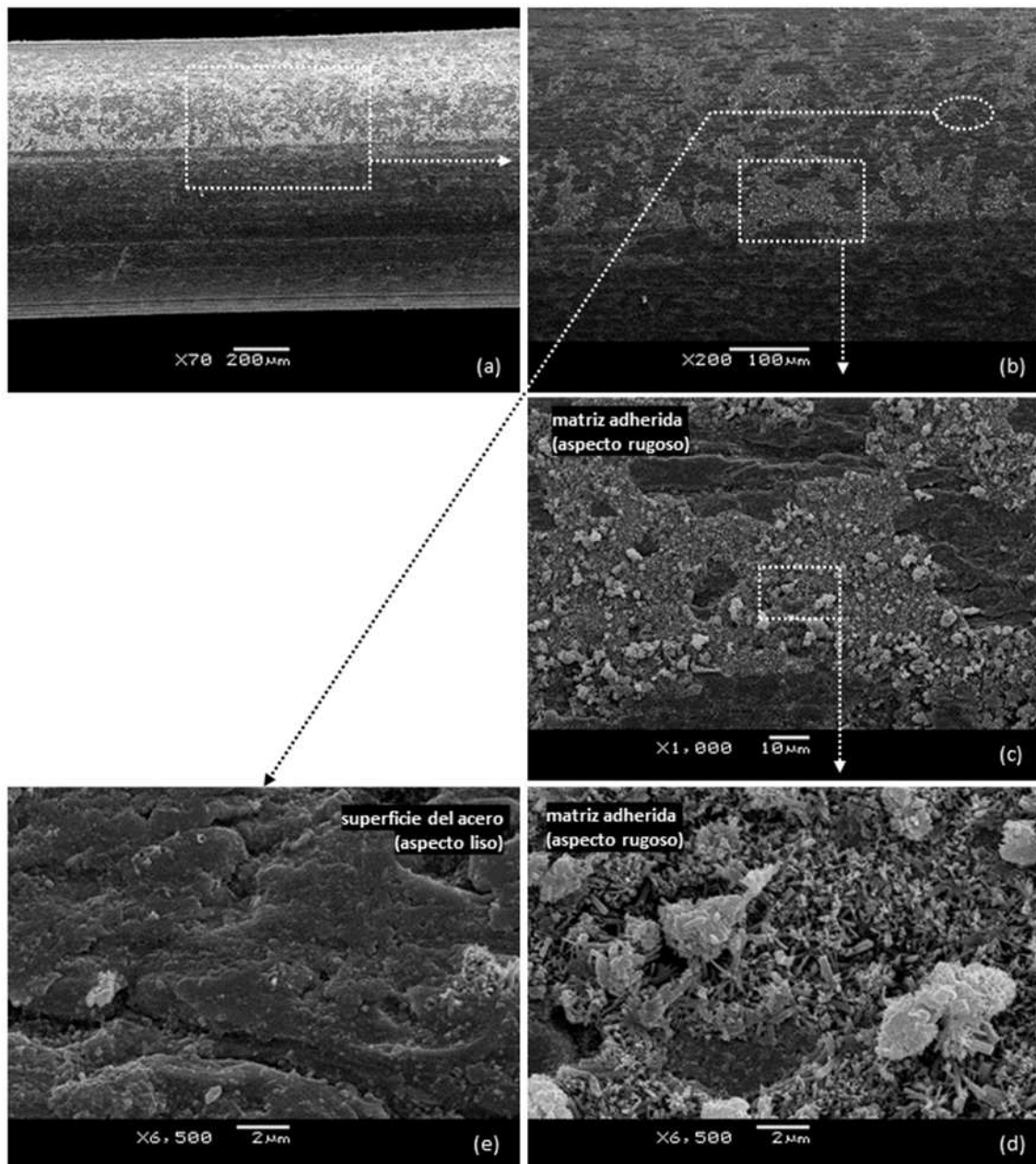


Figura 4-50. Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH1/15/R

En las Figuras 4-51, 4-52 y 53, y 4-54 se presentan imágenes MEB de la superficie de las fibras de acero arrancadas de las matrices MH2/0/R, MH2/10/R y MH2/15/R respectivamente. Cabe señalar que no se presentan imágenes de la matriz MH2/5/R ya que dichas muestras quedaron expuestas en ambiente de laboratorio de la Unidad de Microscopía Electrónica de Barrido de la Facultad de Ciencias (UdelaR) durante un período de dos meses y medio, ya que la Unidad permaneció cerrada al público debido al recrudecimiento de la situación de COVID a comienzos del 2021. Durante ese período el proceso de hidratación del cemento de las muestras continuó, no pudiéndose aplicar el procedimiento descrito en el apartado 3.3.2.2 del Capítulo 3, lo cual las coloca en condiciones diferentes del resto de las matrices analizadas mediante MEB. En general, al igual que para las matrices MH1, sobre la superficie de la fibra arrancada se identifican claramente dos zonas diferentes, por un lado, restos de matriz adherida a la superficie de la fibra con un aspecto rugoso (Figuras: 4-51 a y b; 4-52 c y f; 4-53 b y c; 4-54b) y, por otro, la superficie del acero “limpia” sin matriz adherida con un aspecto liso (Figura 4-53e).

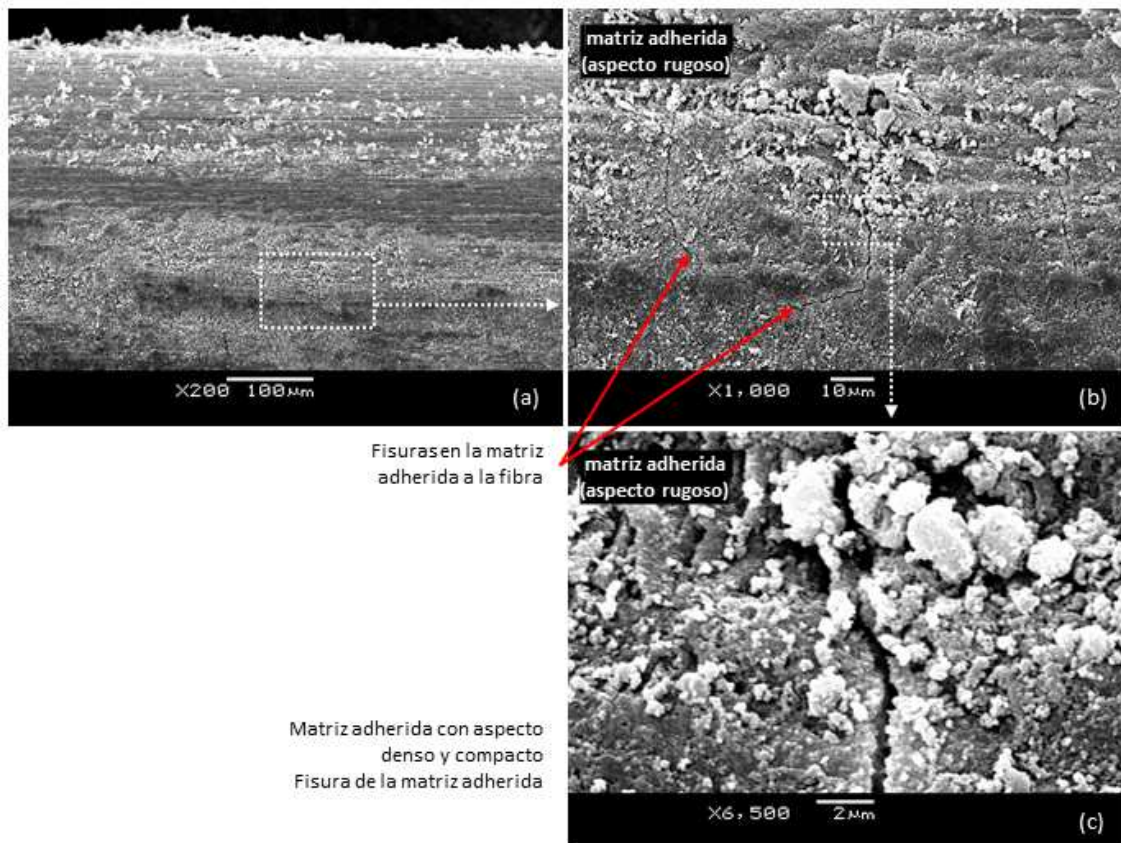


Figura 4-51. Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH2/0/R

Así como en las muestras de fibras de acero arrancadas de la matriz MH1, para la matriz MH2 también se observan en las imágenes MEB (Figura 4-53e) zonas de la superficie de la fibra de acero “limpia” (sin matriz adherida) con diferentes topografías (surcos, irregularidades, sectores más uniformes). Pero para la matriz MH2, estas zonas se distinguen en menor proporción que para las fibras de acero arrancadas de la matriz MH1.

Por otra parte, en la zona donde la matriz quedó adherida a la superficie de la fibra de acero, también se observa la presencia de productos de hidratación del cemento que se reconocen por su morfología y aspecto. En el caso de la matriz MH2, además de identificarse los cristales en forma de agujas cortas y sectores de material compacto que corresponden al silicato de calcio hidratado CSH (Figuras: 4-51c; 4-52 d y g; 4-54c), también se reconocen otro tipo de cristales de forma poligonal (Figuras: 4-53d; 4-54c) que no se observaron en la matriz MH1, y que corresponden a productos de hidratación (ferropericlasa) propios de los cementos Pórtland que contienen escoria granulada de alto horno como pueden apreciarse en el trabajo de (Tzevelekou et al., 2020); cabe observar que el cemento empleado en esta tesis es cemento portland compuesto (CPC), en base a escoria granulada de alto horno y filler calcáreo. El aspecto de la matriz MH2 adherida es más densa y compacta (Figuras: 4-51c; 4-52g; 4-53d; 4-54c) que la matriz MH1, también puede observarse que la propia matriz adherida se fisuró durante el arrancamiento por pullout (Figuras: 4-51 b y c; 4-52g). Por otra parte, en las Figuras 4-52b y 4-52c puede observarse que la microfibrilla polimérica quedó adherida a la matriz.

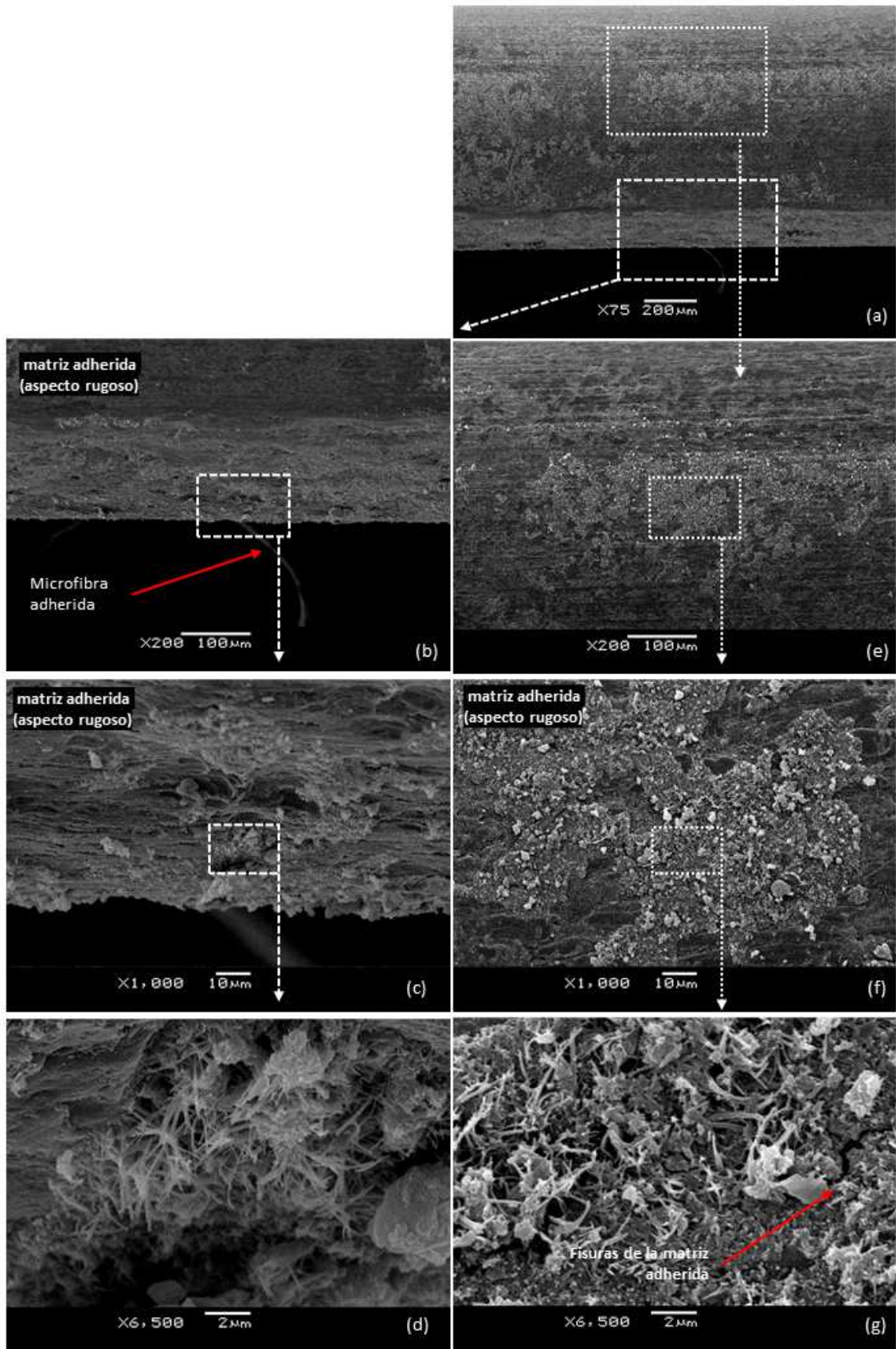


Figura 4-52. Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH2/10/R

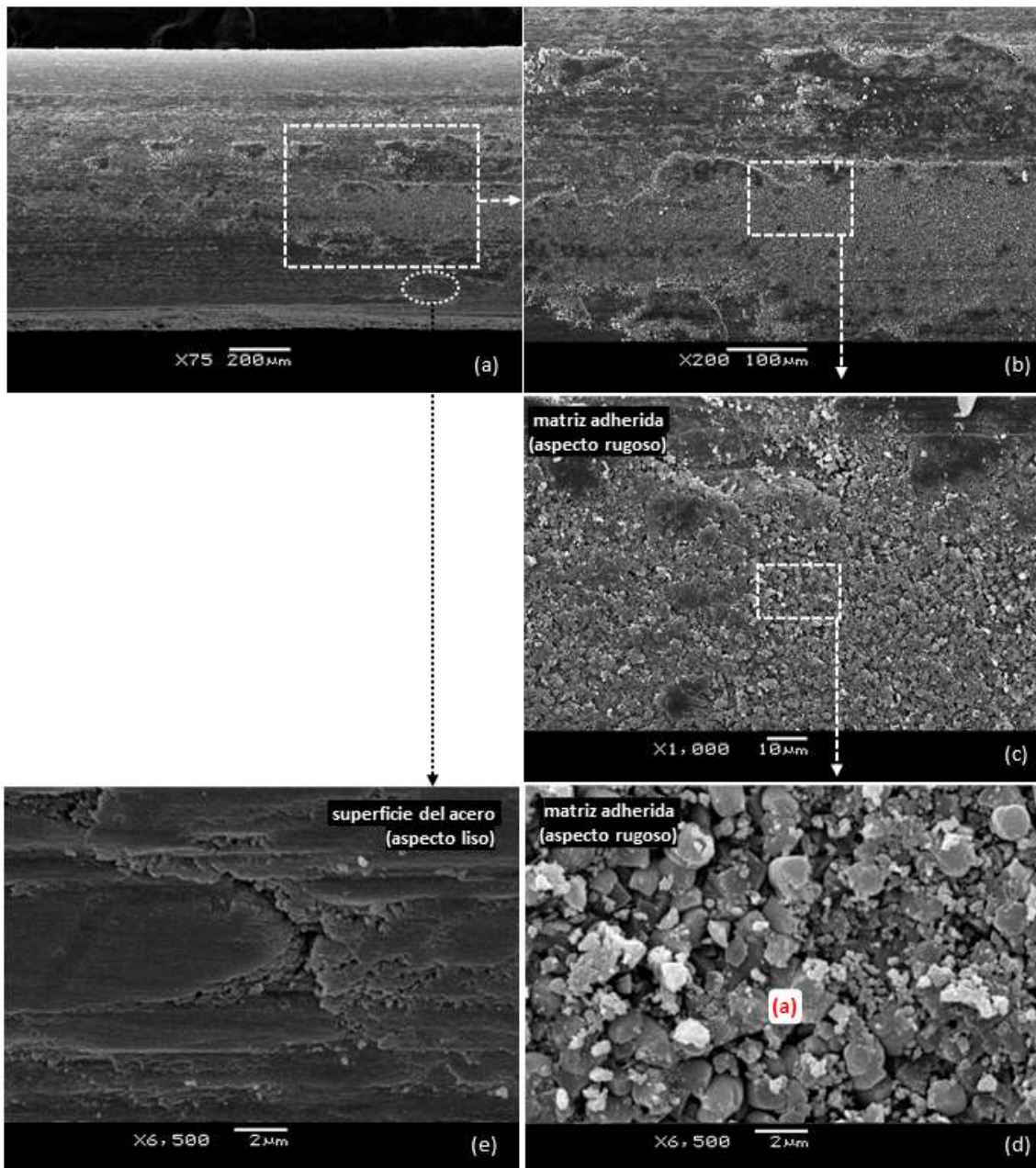


Figura 4-53. Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH2/10/R

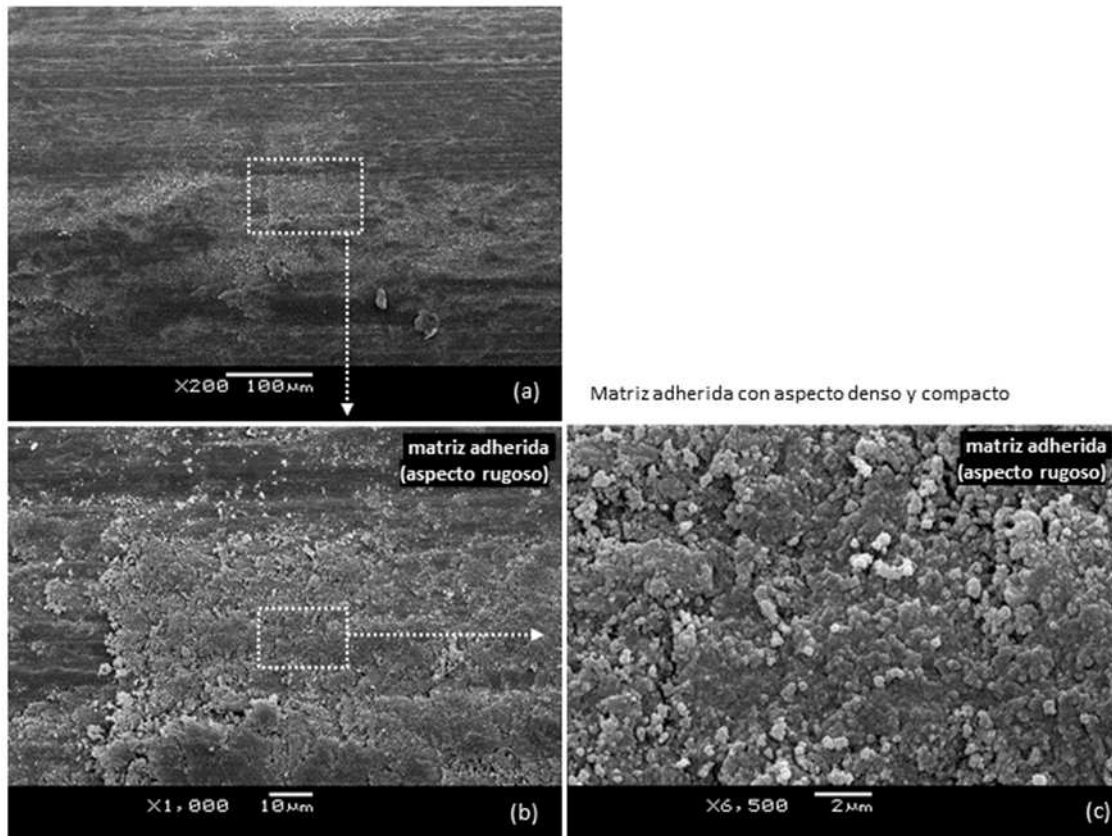


Figura 4-54. Imágenes MEB de la fibra de acero extraída de la matriz MH2/15/R

A continuación, se presenta un resumen del estudio microscópico realizado sobre las diferentes matrices estudiadas, en particular, en la zona del surco que deja la fibra al ser arrancada. Se analizaron dos zonas que corresponden al valle del surco propiamente y al borde del surco, a su vez en este último se analiza la zona de transición (ZdeT) entre la fibra y la matriz.

En primer lugar, se analiza la matriz MH1 con diferentes contenidos de microfibras observando en cada muestra las zonas del valle del surco y el borde del surco para las mezclas identificadas como MH1/0/R (Figuras 4-55 y 4-56), MH1/5/R (Figuras 4-57 y 4-58), MH1/10/R (Figuras 4-59 y 4-60) y MH1/15/R (Figuras 4-61 y 4-62). En general, en el surco que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas: una zona rugosa e irregular, que corresponde al sector de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa “huella” en el surco; una zona más lisa y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda “impresa” el aspecto superficial de la fibra de acero. También se observan microfisuras.

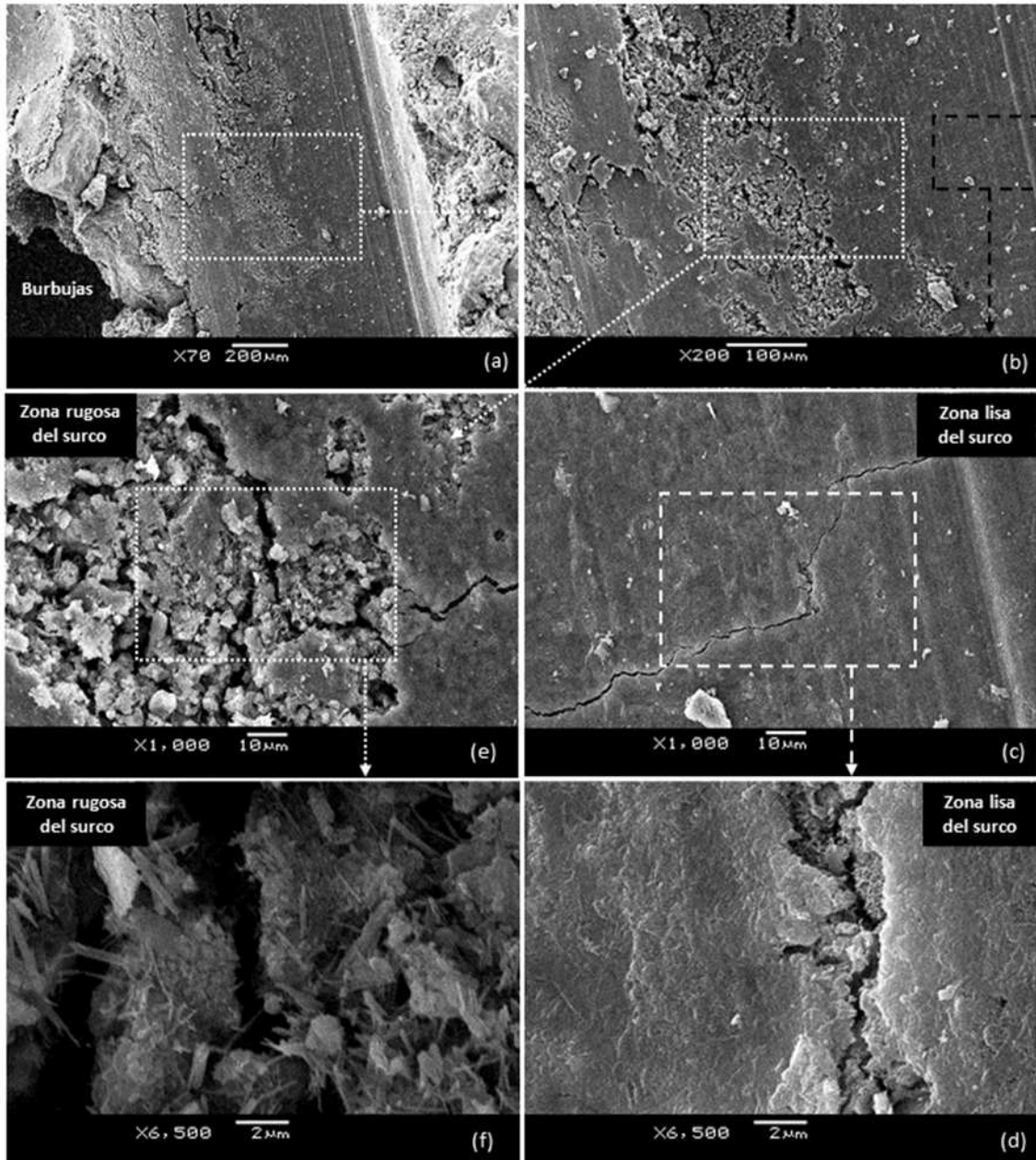


Figura 4-55. Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH1/0/R

En la zona rugosa del **surco de la matriz MH1/0/R** donde la matriz fue arrancada (Figuras 4-55 e y f), se observan por una parte algunos cristales en forma de agujas cortas alrededor de partículas de material compacto formando como “erizos” que corresponden a CSH y, por otro lado, también se observan fisuras y zonas huecas. En la Figura 4-55d se observa en detalle los bordes de una microfisura donde puede visualizarse la presencia de una estructura de aspecto “esponjoso” que corresponden también a productos de hidratación de CSH propio de los cementos con escoria granulada de alto horno según indica (Kurdowski, 2014). En el **borde del surco** (Figura 4-56), en particular en la ZdeT entre F-M, se observan cristales de CH en forma de grandes placas hexagonales (Figura 4-56e); cristales en forma de agujas cortas y partículas de material compacto de CSH (Figuras 4-56 f y g); fisuras y zonas huecas; así como burbujas de aire atrapado. Por otra parte, en el borde del surco del lado que corresponde a la “ladera” se observan cristales en forma de agujas cortas en las cavidades y alrededor del material compacto de CSH (Figuras 4-56 c y d).

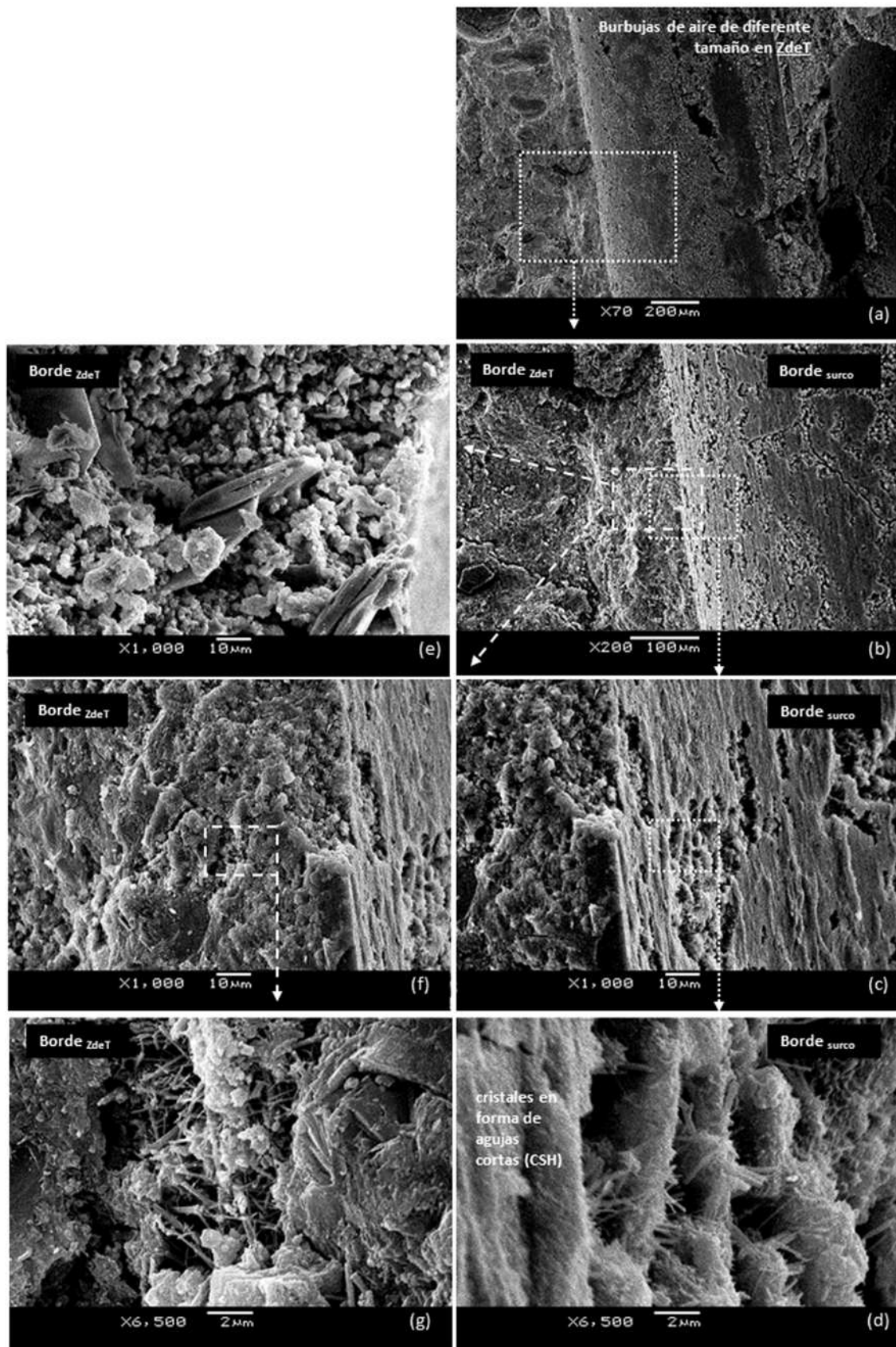


Figura 4-56. Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH1/0/R

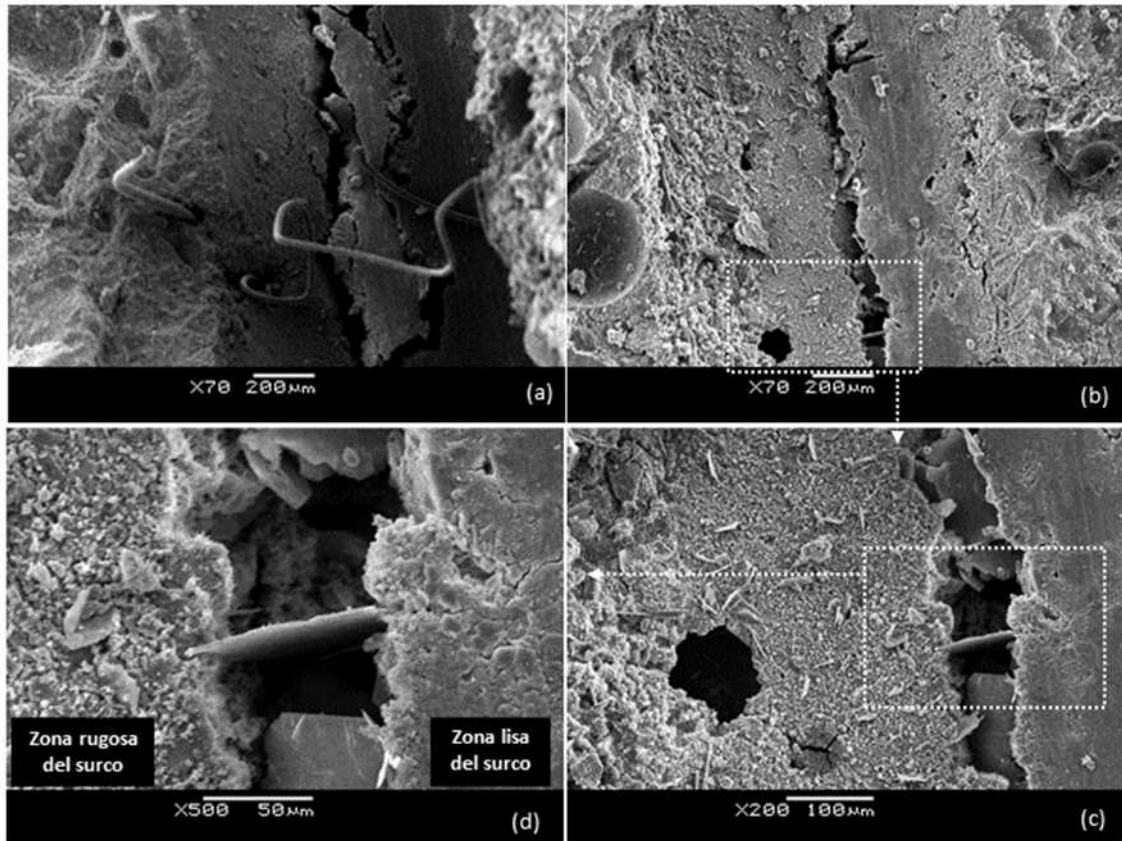


Figura 4-57. Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH1/5/R

En las Figuras 4-57 se observa el **surco** dejado por la fibra al ser arrancada de la **matriz MH1/5/R**, donde se visualizan microfibras poliméricas en el surco y en ZdeT (Figura 4-57a), así como también se pueden ver fisuras y burbujas de aire atrapado (Figuras 4-57 b y c) de diferentes tamaños tanto en el surco propiamente como en la ZdeT. En la zona rugosa del surco (costado derecho de la fisura) se ven cristales hexagonales (CH) incrustados en la superficie (Figura 4-57c). En la Figura 4-57d se muestra un detalle de la fisura donde se observa, por un lado, en su interior la presencia de cristales hexagonales de CH y, por otro, sobre los bordes de la fisura hay cristales en forma de agujas cortas de CSH. También puede apreciarse la zona lisa del surco (costado izquierdo de la fisura) donde la matriz no quedó adherida a la fibra de acero. Por otro lado, en las Figuras 4-58, se muestra una secuencia de imágenes MEB del **borde del surco**, donde pueden apreciarse burbujas de aire atrapado en la ZdeT (Figura 4-58a). En el detalle de la ZdeT entre F-M (Figura 4-58e) se observan cristales en forma de agujas cortas entorno al material sólido (CSH) y zonas huecas. En la zona rugosa de la “ladera” del surco, donde la matriz fue arrancada, se observan muchos cristales hexagonales (CH) aislados y agrupados, rodeados de cristales en forma de agujas cortas sobre el material compacto de CSH (Figura 4-58c).

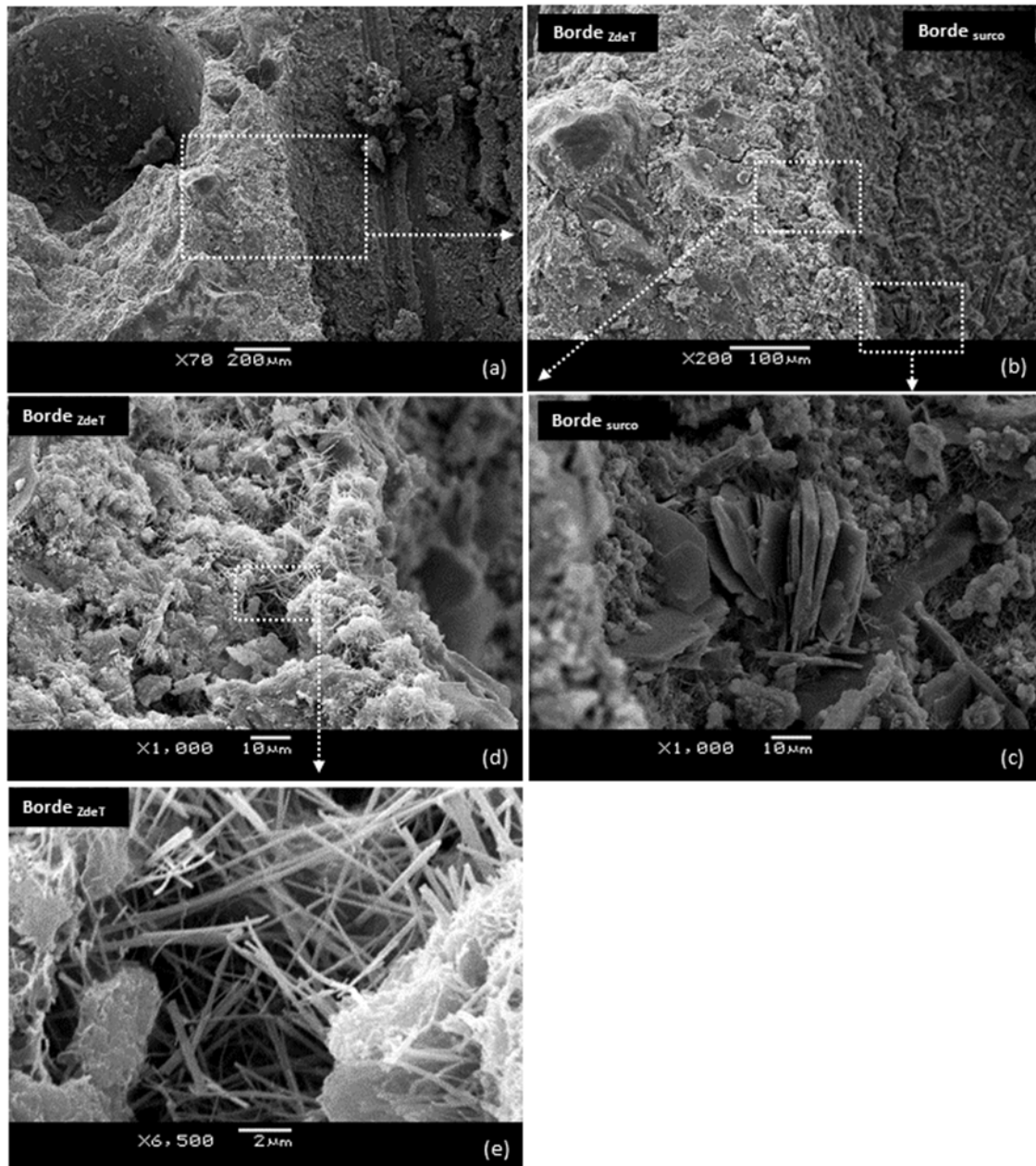


Figura 4-58. Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH1/5/R

En las Figuras 4-59 se observa el **surco** dejado por la fibra al ser arrancada de la **matriz MH1/10/R**, donde se visualizan microfibras poliméricas y burbujas de aire atrapado (Figuras 4-59a) de diferentes tamaños en la ZdeT. En la zona rugosa del surco (Figura 4-59 f y g) se visualizan cristales en forma de agujas cortas entorno al material compacto (CSH), fisuras y zonas huecas. En la zona lisa del surco se ve “impresa” la topografía de la superficie de la fibra de acero “limpia” (sin matriz adherida). En el borde del surco, en particular, en la **ZdeT entre F-M** se observan cristales en forma de agujas cortas entorno al material compacto de CSH (Figura 4-60f), fisuras, zonas huecas y burbujas de aire atrapado. En la Figura 4-60d se aprecia en detalle la ZdeT donde puede apreciarse una primera película continua de producto hidratado, seguida por una capa de agujas cortas de CSH y a continuación el material compacto.

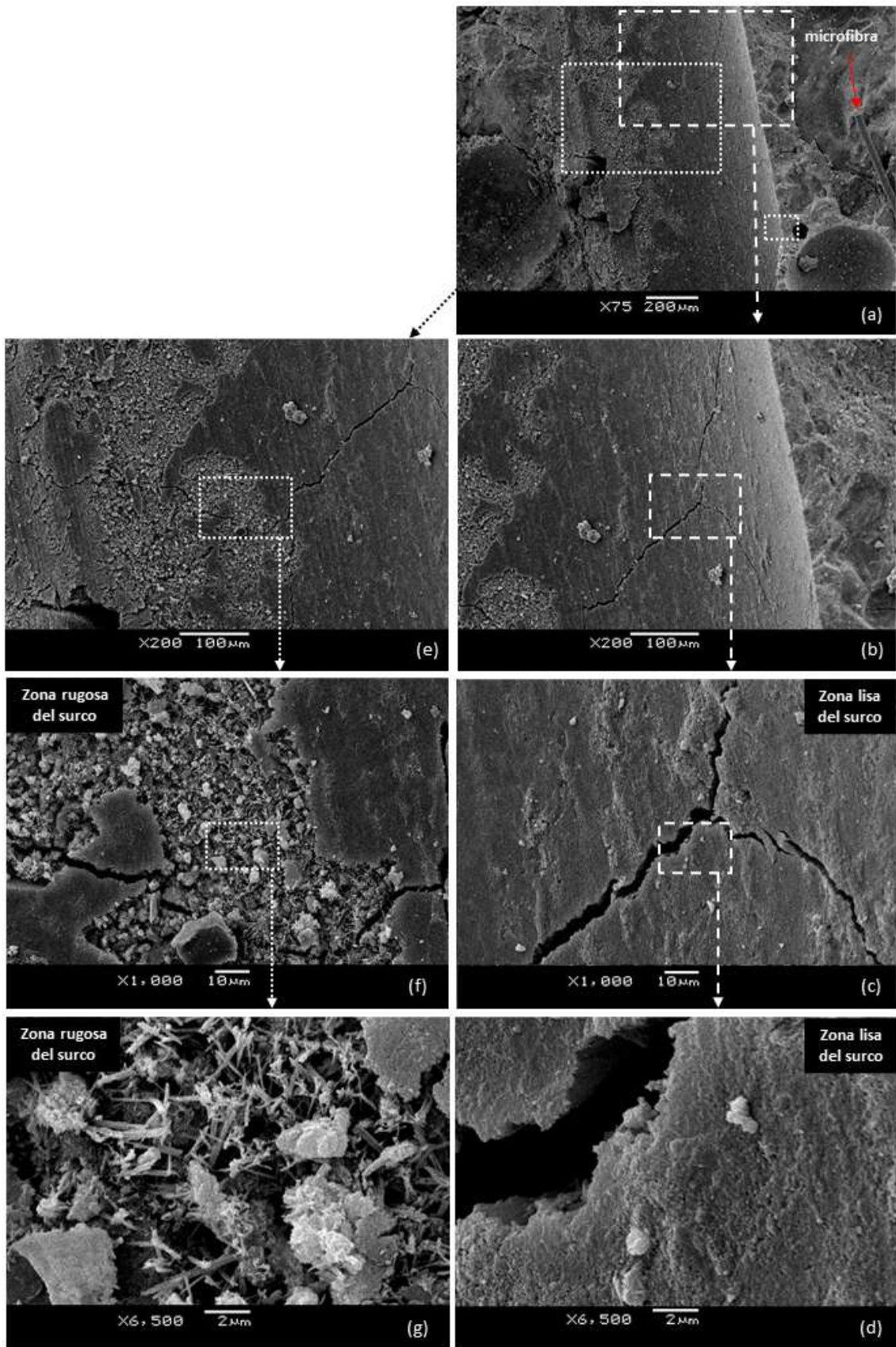


Figura 4-59. Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH1/10/R

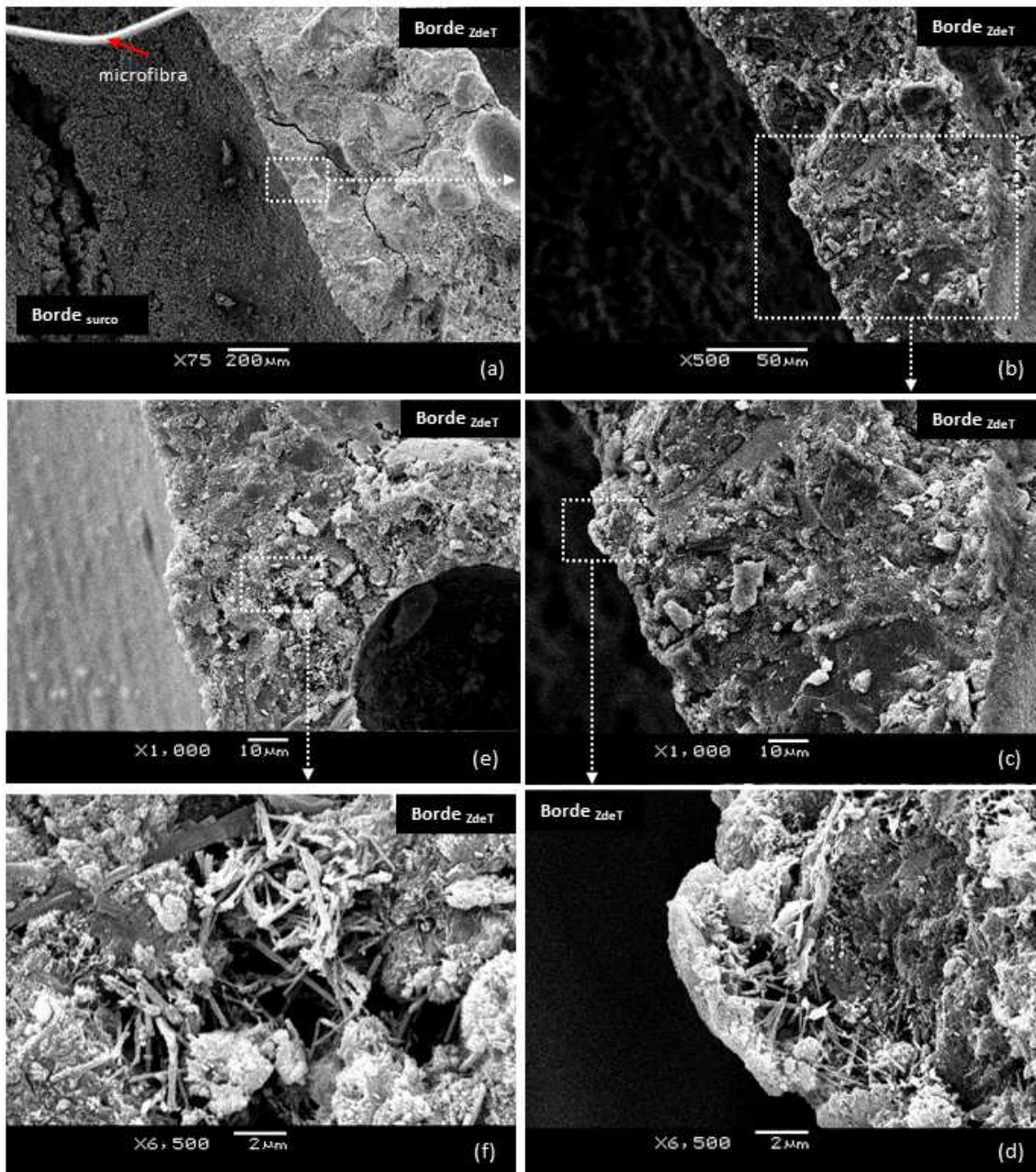


Figura 4-60. Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH1/10/R

En la Figura 4-61a se observa el **surco** dejado por la fibra al ser arrancada de la **matriz MH1/15/R**, donde se visualizan las mismas dos zonas del surco (rugosa y lisa) y en los bordes del surco se ven burbujas de aire atrapado de diferentes tamaños. En la zona rugosa del surco se observan algunos cristales en forma de agujas cortas sobre el material compacto (CSH) (Figura 4-61f), mientras que en la Figura 4-61g se muestra un detalle de cristales en forma de agujas largas dispuestos en forma radial que corresponde a etringita (producto de hidratación del aluminato tricálcico). El **borde del surco** se ve lateralmente, y se observa que en este sector la matriz no se adhirió a la fibra, y en ella queda “impresa” el aspecto superficial de la fibra de acero (Figuras 4-62 e y f). En particular, en la **ZdeT entre F-M** (Figuras 4-62 c y d) se observan cristales en forma de agujas cortas entorno al material compacto (CSH), así como también fisuras y zonas huecas.

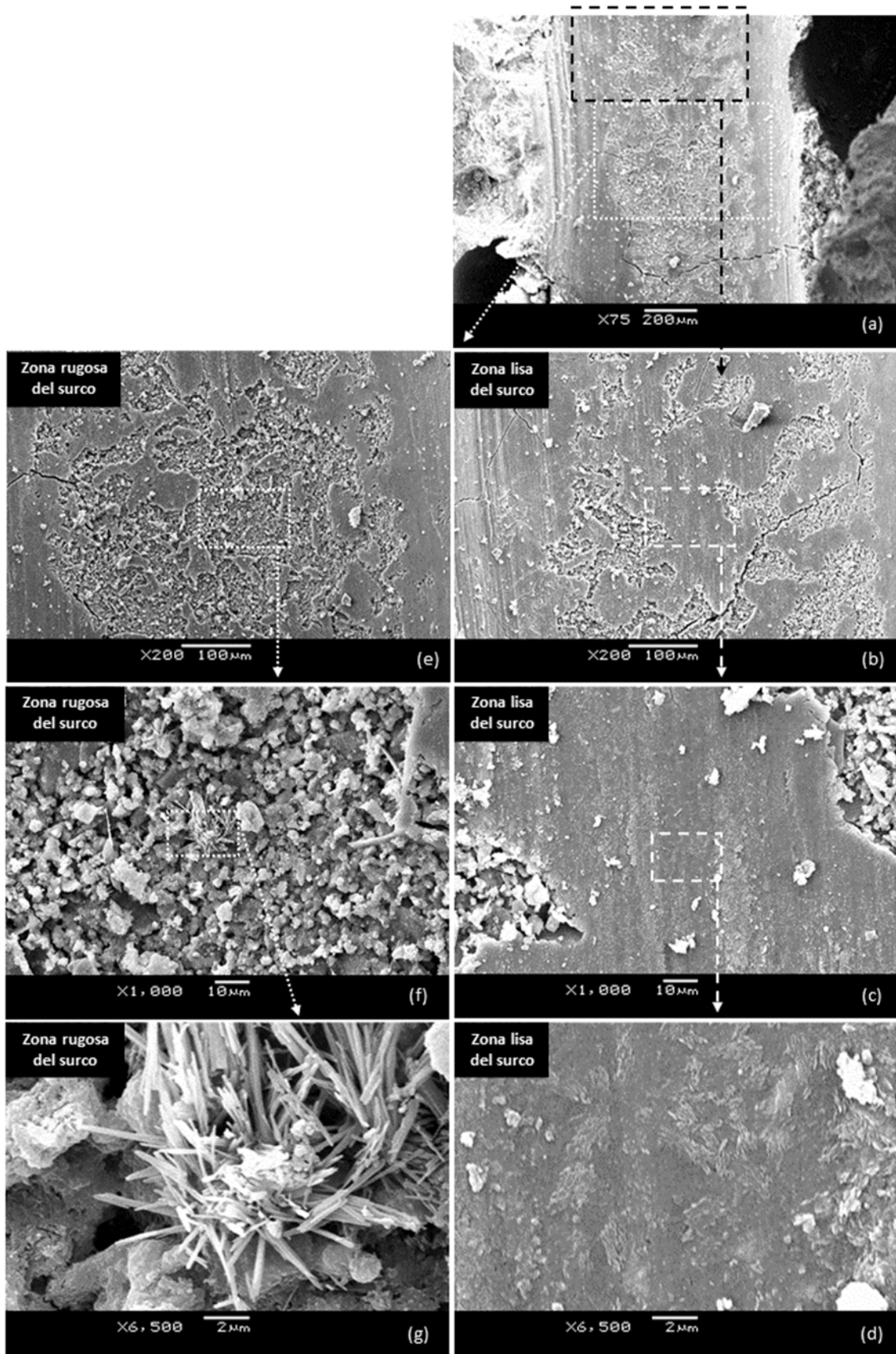


Figura 4-61. Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH1/15/R

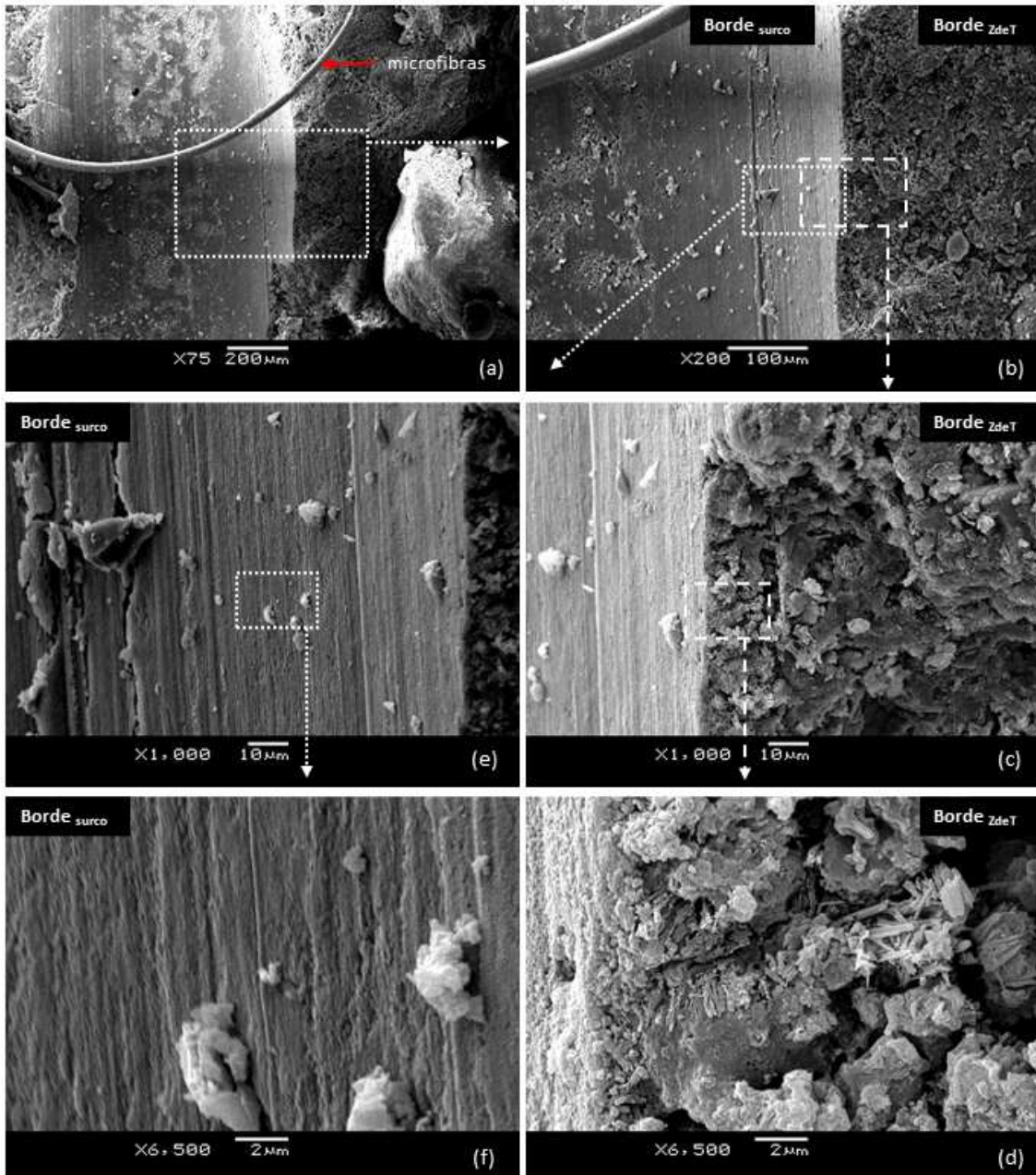


Figura 4-62. Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH1/15/R

A continuación, luego de haber estudiado la matriz MH1, se analiza la **matriz MH2** con diferentes contenidos de microfibra observando en cada muestra las zonas del valle del surco y el borde del surco para las mezclas identificadas como MH2/0/R (Figuras 4-63 y 4-64), MH2/10/R (Figuras 4-65 y 4-66) y MH2/15/R (Figuras 4-67 y 4-68). No se presentan imágenes MEB de la matriz MH2/5/R por los motivos mencionados previamente. Al igual que para la matriz MH1, aquí también se identifican las mismas dos zonas en el surco que deja la fibra al ser arrancada por pullout: una zona rugosa e irregular (matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y al ser arrancada deja esa “huella” en el surco), y una zona más lisa y uniforme (matriz sin adherir a la fibra, queda impresa la topografía superficial de la fibra de acero). En el caso de la matriz MH2, la zona rugosa se observa en mayor cantidad. También se observan microfisuras.

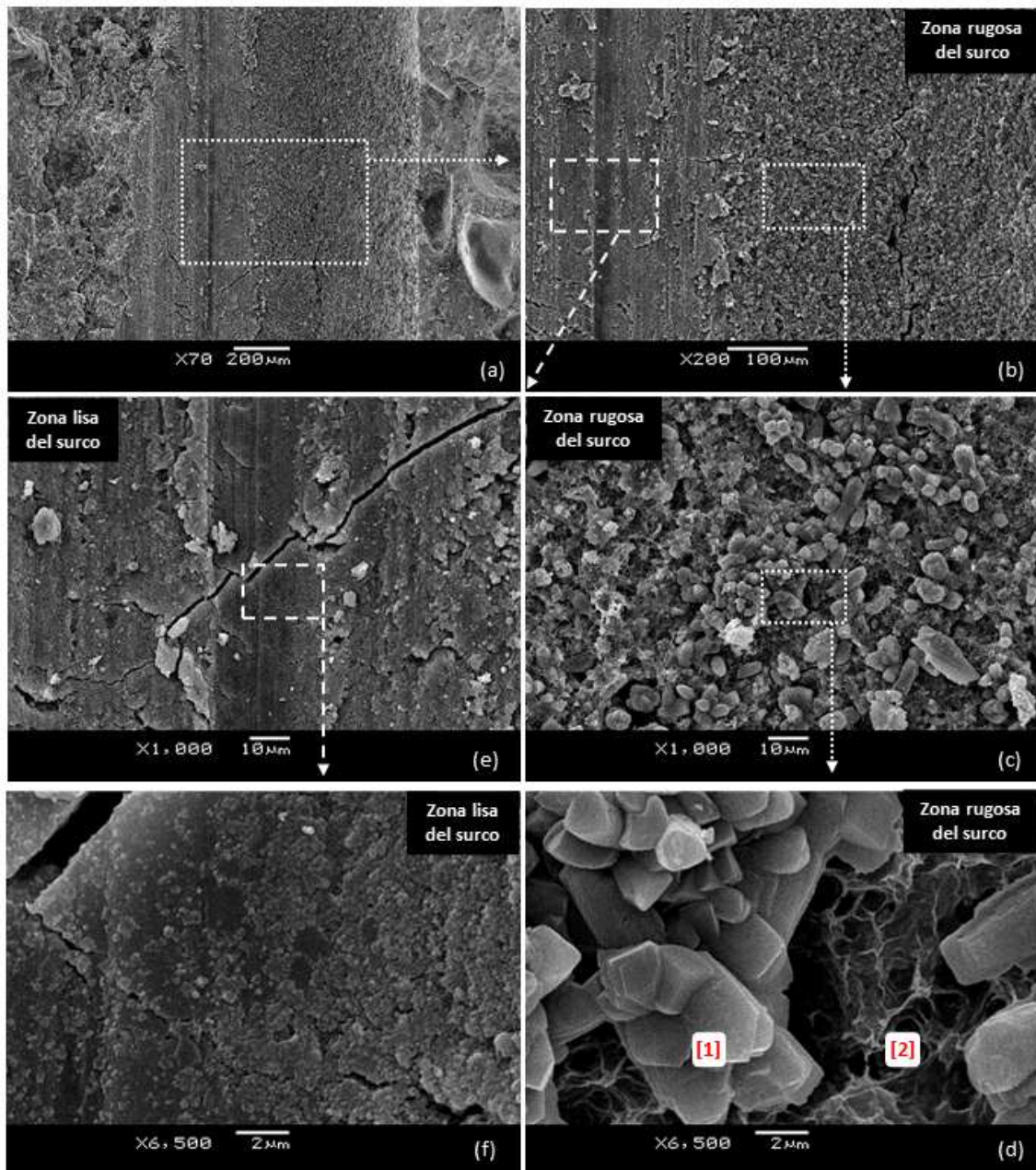


Figura 4-63. Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH2/0/R

En la zona rugosa del **surco de la matriz MH2/0/R** donde la matriz fue arrancada (Figuras 4-63 c y d) se observa, por una parte, grupos de cristales más compactos y de sección poligonal variable (identificados como [1] en la Figura 4-63d) que, como ya fuera mencionado previamente, corresponden a productos de hidratación (ferropericlasa) propios de los cementos Pórtland que contienen escoria granulada de alto horno como puede apreciarse en el trabajo de (Tzevelekou et al., 2020). Este tipo de productos de hidratación sólo se aprecia en la matriz MH2, al igual que cuando se analizó la superficie de las fibras de acero, y no así en la matriz MH1. Por otra parte, también se visualiza una estructura similar a un tejido “esponjoso” (identificados como [2] en la Figura 4-63d) que corresponde a productos de hidratación de CSH según lo indicado por (Franus et al., 2015), y que según (Kurdowski, 2014) este tipo de entramado se aprecia en cementos con escoria granulada de alto horno. Esta estructura similar a un tejido “esponjoso” genera un entramado de unión entre los cristales más compactos.

En el **borde del surco**, en particular, en la zona de la “ladera” del surco (Figuras 4-64 e y f) se aprecia esta misma estructura detallada previamente pero ahora vista lateralmente. Por otro lado, en la ZdeT entre F-M, se observa grandes sectores de material compacto de CSH (Figuras 4-64 c y d). Cabe señalar, que no se observan burbujas de aire atrapado (Figuras 4-63a; Figura 4-64a) tan frecuentemente como ocurría en la matriz MH1. En general, se aprecia que el aspecto de la matriz MH2 es más densa y compacta que la matriz MH1.

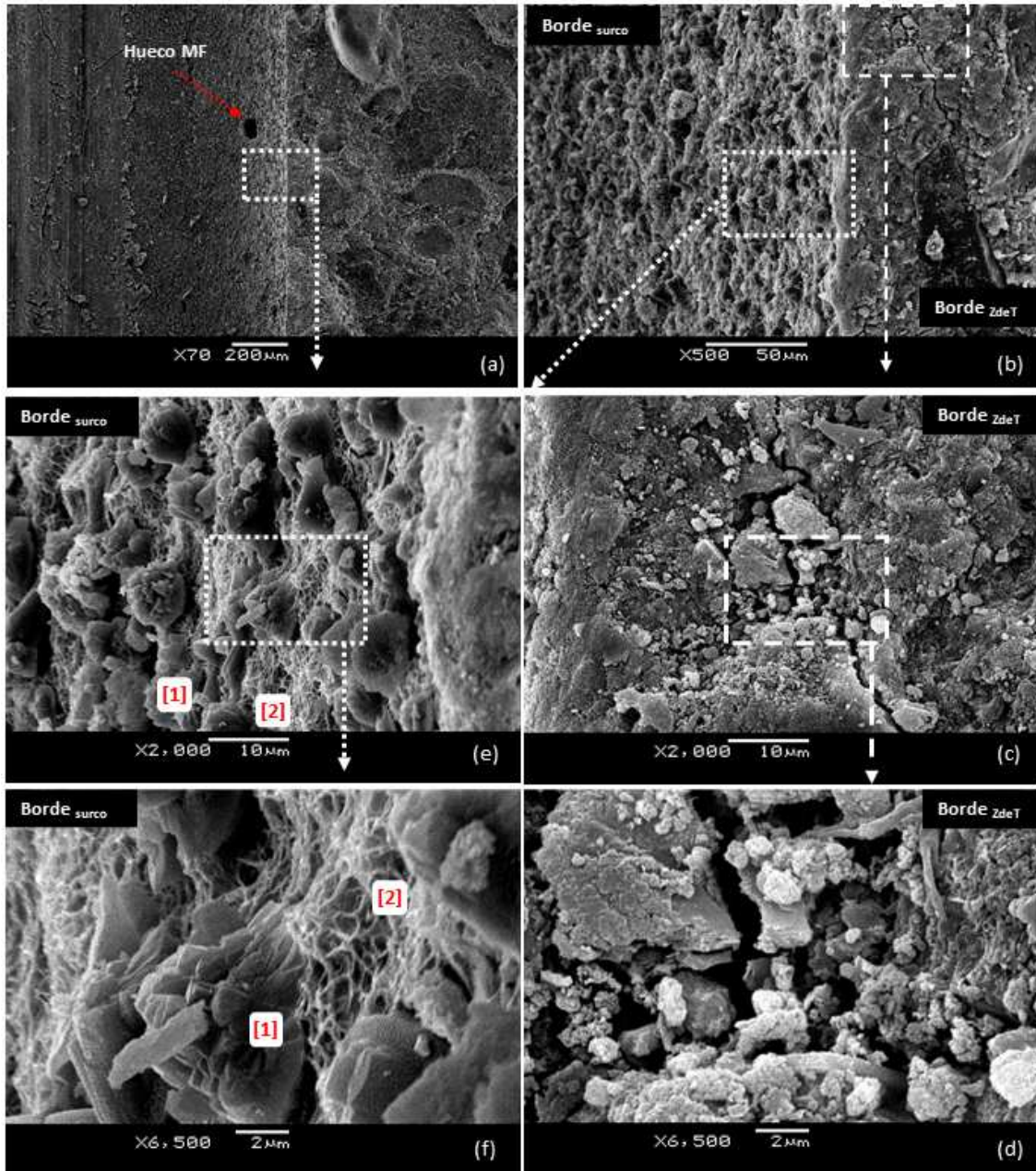


Figura 4-64. Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH2/0/R

A continuación, se presentan imágenes MEB del surco (Figura 4-65) y borde (Figura 4-66) de la **matriz MH2/10R**, así como del surco (Figura 4-67) y borde (Figuras 4-68/4-69) de la **matriz MH2/15R**. Prácticamente en ambos casos pueden hacerse observaciones muy similares a las realizadas para la matriz MH2/0/R en cuanto a:

- SURCO: se visualizan los mismos productos de hidratación (Figura 4-65f; Figura 4-66 d y f; Figura 4-67d; Figura 4-68g; Figura 4-69 c y d): grupos de cristales más compactos de sección poligonal variable [1] y una estructura similar a un tejido “esponjoso” [2];
- BORDE del SURCO: en la ZdeT entre F-M también se observan grandes sectores de material compacto de CSH (Figura 4-65a; Figuras 4-66 a, b y c; Figura 4-67e; Figuras 4-68 c, d y e);
- no se observan burbujas de aire atrapado (Figura 4-65a; Figura 4-66 a y b; Figura 4-67 a, b y c; Figura 4-68 a y b; Figura 4-69a) como ocurría en la matriz MH1;
- se aprecia en general que el aspecto de la matriz MH2 es más densa y compacta que la matriz MH1.

Complementariamente, se observa la presencia de microfibras (Figura 4-65 a y b; Figura 4-67 a, e y f; Figura 4-68a) en la zona del surco y de la ZdeT, que actúan como un “cosido” de microfisuras.

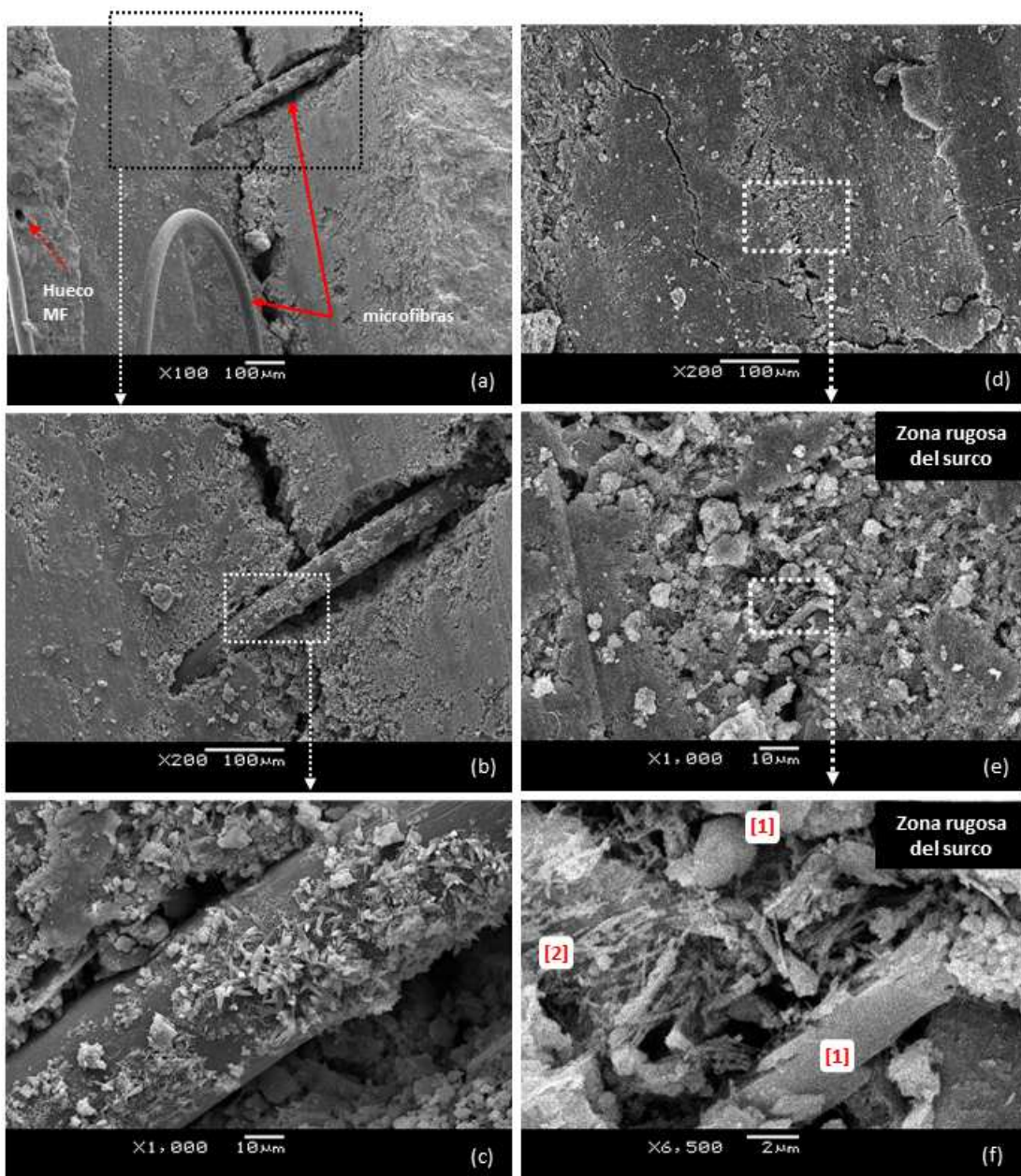


Figura 4-65. Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH2/10/R

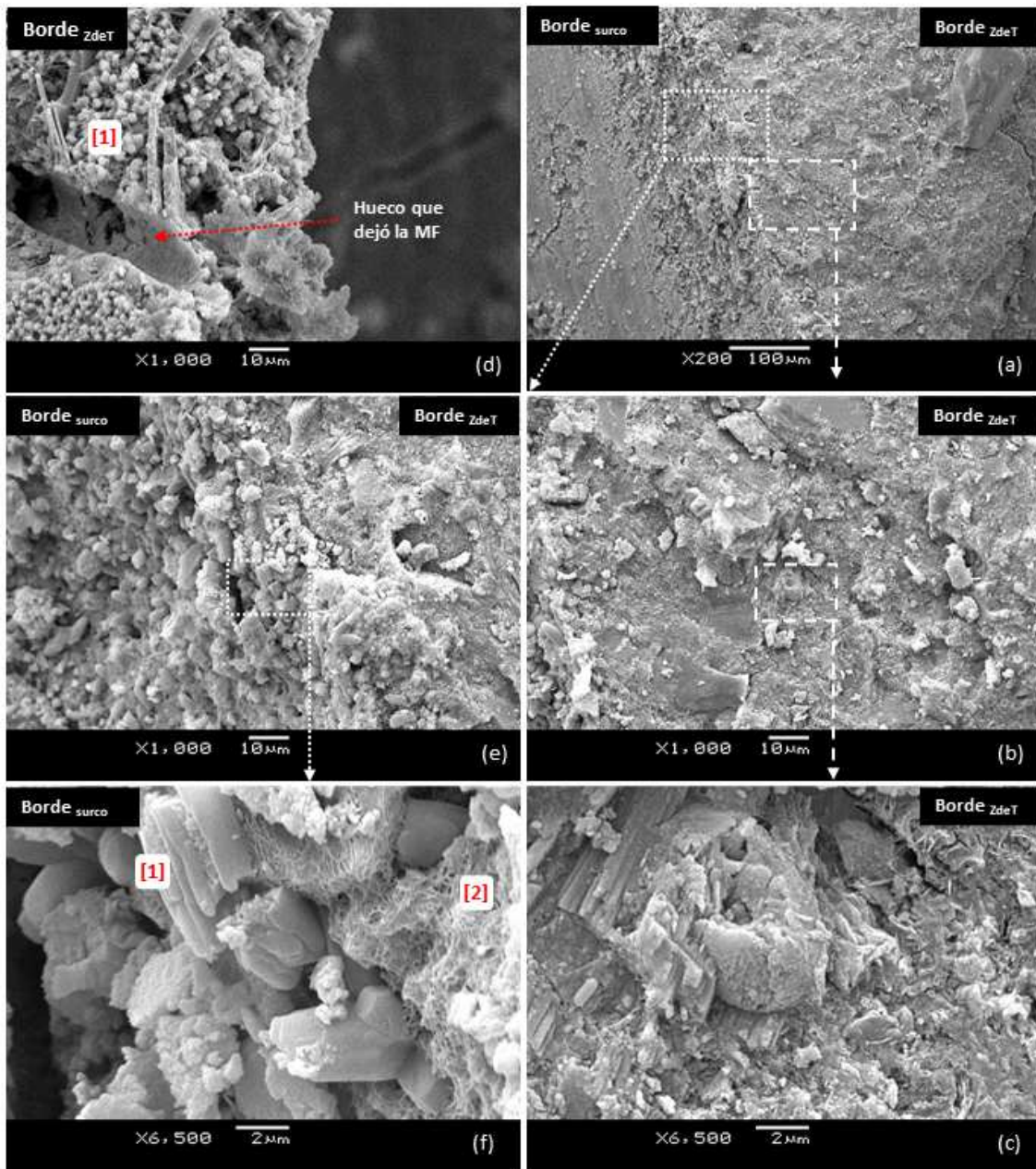


Figura 4-66. Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH2/10/R

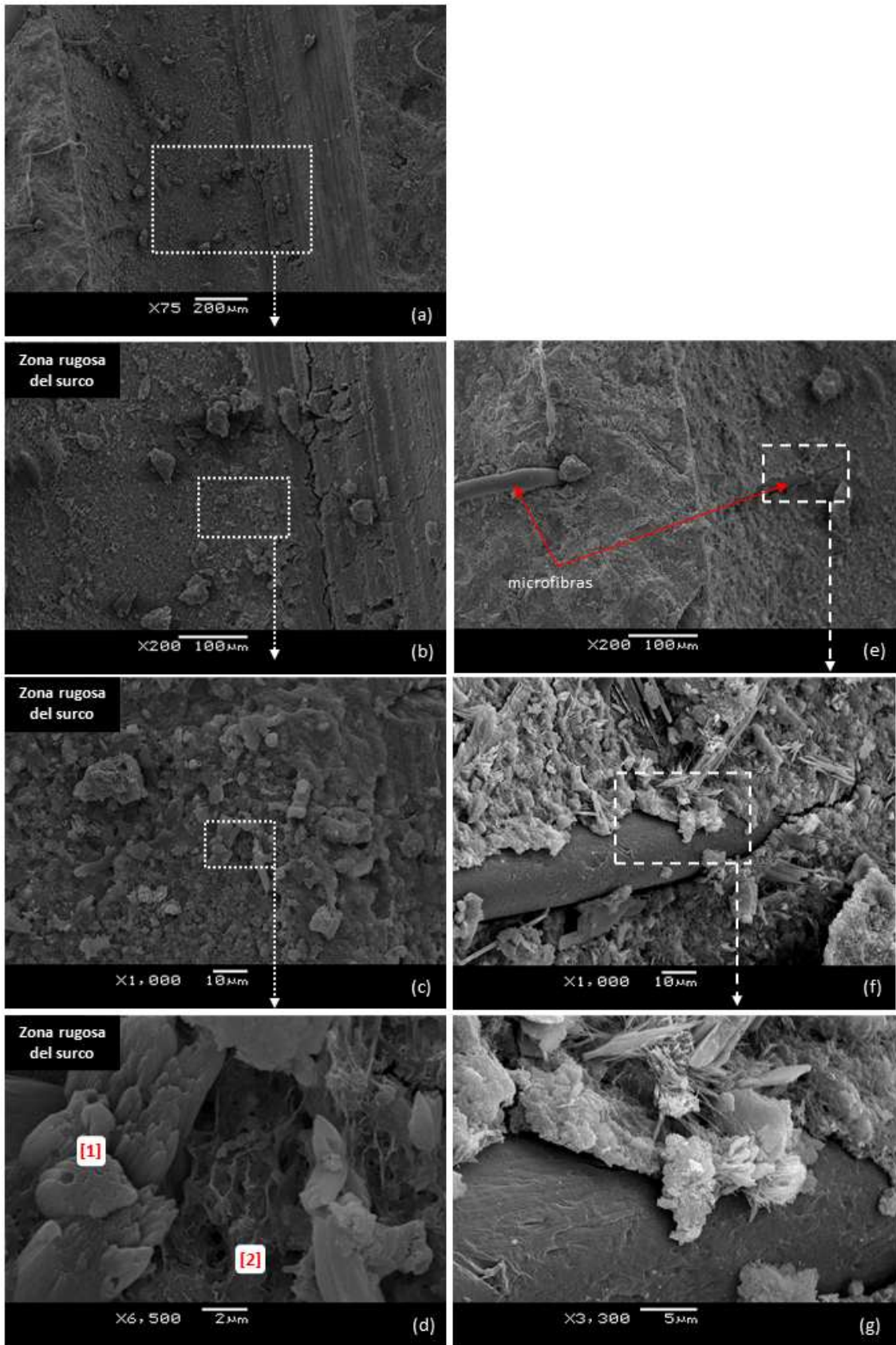


Figura 4-67. Imágenes MEB de la zona del surco dejado en la matriz MH2/15/R

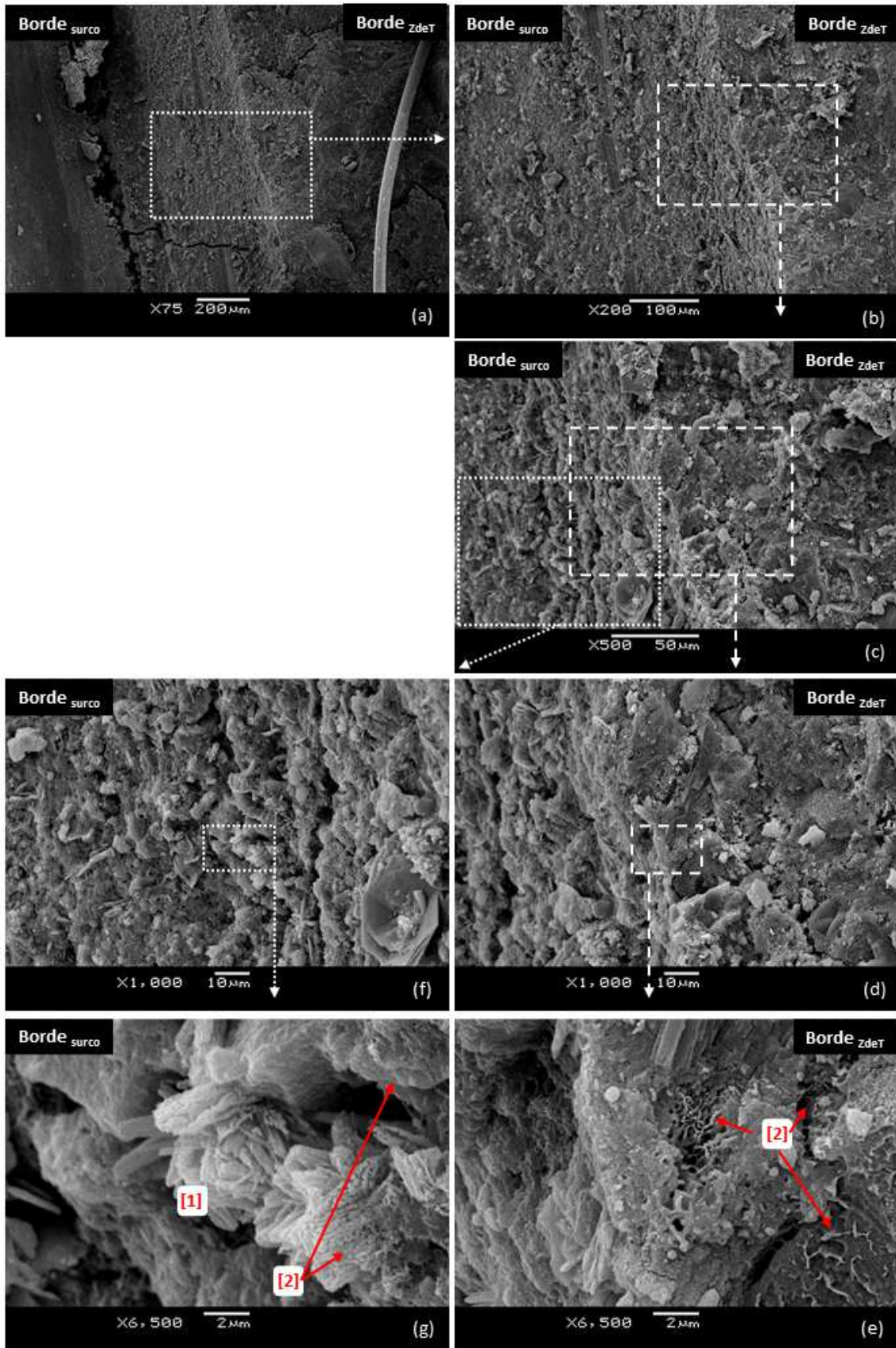


Figura 4-68. Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH2/15/R

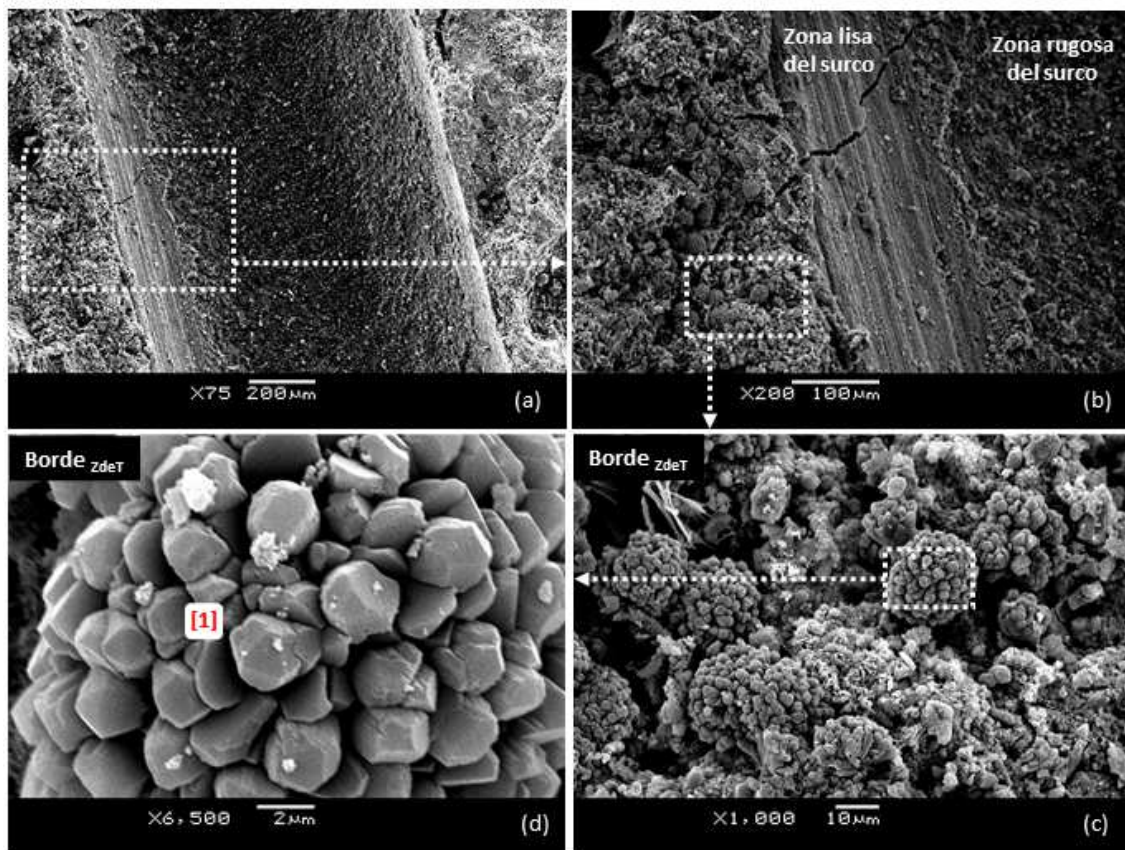


Figura 4-69. Imágenes MEB de la zona del borde del surco dejado en la matriz MH2/15/R

4.2.3 Correlación de resultados a nivel macro y microestructural

Como fuera explicitado previamente, el análisis de la interfaz F-M se abordó a través de dos escalas:

- **a escala macroestructural**, mediante la evaluación del comportamiento mecánico de ambos tipos de fibras (recta y con gancho) a través del **ensayo de pullout**, que consiste en el arrancamiento de la fibra metálica de la matriz cementícea, se pueden identificar **tres tipos de modo de falla**: estallido de la matriz, rotura de la fibra, falla de la interfaz F-M. Como fuera mencionado previamente, el modo de falla registrado en los ensayos de pullout realizados durante la campaña experimental siempre fue por extracción de la/s fibra/s, es decir que el elemento que falla es la interfaz F-M. A través del análisis de la relación entre la carga de pullout vs. el desplazamiento de la fibra, se pueden analizar los diferentes **mecanismos de unión de la interfaz F-M**: adherencia química, fricción, anclaje mecánico (para fibras con gancho).
- **a escala microestructural**, mediante la **observación de imágenes MEB** de la superficie de fibras de acero y muestras de matriz obtenidas después de realizar el ensayo de pullout de las probetas con una única fibra de acero con extremo recto (dispositivo 1). En particular, las muestras de la matriz corresponden a la zona del surco que deja la fibra al ser arrancada, analizando en particular la superficie del surco y el borde del surco para visualizar la ZdeT entre F-M.

En base a lo planteado, a continuación, se correlacionan los resultados obtenidos en ambas escalas de análisis, **colocando el foco en el mecanismo de unión por “adherencia química” de la interfaz F-M.**

En forma general, en cuanto al **análisis a escala macroestructural**, se evidencia una fuerte incidencia del tipo de matriz en el mecanismo de unión por adherencia química en la interfaz F-M, ya que las mezclas de la matriz MH2 presentan **mejores resultados mecánicos** frente a las mezclas MH1, en cuanto a los parámetros analizados: cargas máximas (P_1 , P_2), fuerza de fricción y energía de pullout (E_p). Mientras que, en cuanto al efecto de la presencia de las microfibras poliméricas dentro de cada tipo de matriz (MH1 y MH2), el contenido de 0,15% también tiene una incidencia mayor en los mismos parámetros. En particular, en el análisis del mecanismo de unión por adherencia química de la interfaz F-M, se observó un comportamiento diferenciado según el tipo de matriz en las etapas 1 y 2. Mientras que para las muestras de matriz MH1 se produce una sola carga máxima (P_1) de adherencia química, para las mezclas MH2 se producen dos cargas máximas (P_1 y P_2). En relación con ello, en ambas mezclas la carga máxima P_1 se produce en la misma zona, siendo que la matriz MH2 presenta valores mayores. En cambio, para la matriz MH2, a partir del valor de P_1 (pico de adherencia química) la carga comienza a aumentar nuevamente hasta alcanzar una segunda carga máxima (P_2), que se entiende puede corresponder a una conjunción de dos de los mecanismos de unión de la interfaz F-M: por un lado, a la adherencia química de la interfaz F-M parcialmente dañada y por otro a la fuerza de fricción, ambas actuando en forma conjunta.

En cuanto a las causas que pueden haber detrás de este comportamiento diferenciado entre ambas matrices se podría explicar por el **tipo de matriz** ya que, por una lado, la matriz MH2 es más fuerte que MH1, al tener mayor cantidad de cemento y menor relación agua-cemento hace que su resistencia a compresión sea mayor; y considerando que la resistencia a tracción del hormigón está relacionada con la resistencia a compresión, la matriz MH2 resiste mejor los esfuerzos internos de tracción (observable en los resultados de resistencia a flexión de la Figura 4.2) que se producen en la matriz que rodea la fibra de acero.

Ello concuerda con las evidencias encontradas en **el análisis a escala microestructural** de las imágenes MEB que se presentan en las Figuras 4-70 a 4-73. Por un lado, la matriz MH1 presenta mayor cantidad de huecos y/o burbujas de aire conformando así una matriz más porosa, lo cual lo cual también está vinculado a la presencia de productos de hidratación tales como los cristales con forma de grandes placas hexagonales que corresponden al hidróxido de calcio CH (que se desarrollan en matrices con mayor cantidad de huecos disponibles) y de etringita. Por otro lado, la matriz MH2 presenta un aspecto más compacto y denso (pocos huecos y casi sin burbujas de aire), y los productos de hidratación que se visualizan son grupos de cristales más compactos de sección poligonal variable [1] y una estructura similar a un tejido “esponjoso” [2] que da unión al conjunto; todo ello es lógico dado el alto contenido de cemento y la baja relación agua/cemento de la matriz MH2 que conlleva a que las partículas estén más cerca entre sí.

Todo ello conduce a un aumento de la fuerza de unión química entre la fibra y la matriz que se evidencia en las imágenes MEB analizadas. Por una parte, en la superficie de las fibras de acero arrancadas de la matriz MH2 se observó que había mayor cantidad de matriz adherida, en comparación con las fibras extraídas de la matriz MH1. Por otra parte, en la superficie del surco dejado por la fibra al ser arrancada de la matriz, también se evidenció que la zona identificada como “rugosa e irregular” (que corresponde al sector de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa “huella” en el surco) era mayor en el caso de las muestras de matriz MH2 en comparación con MH1.

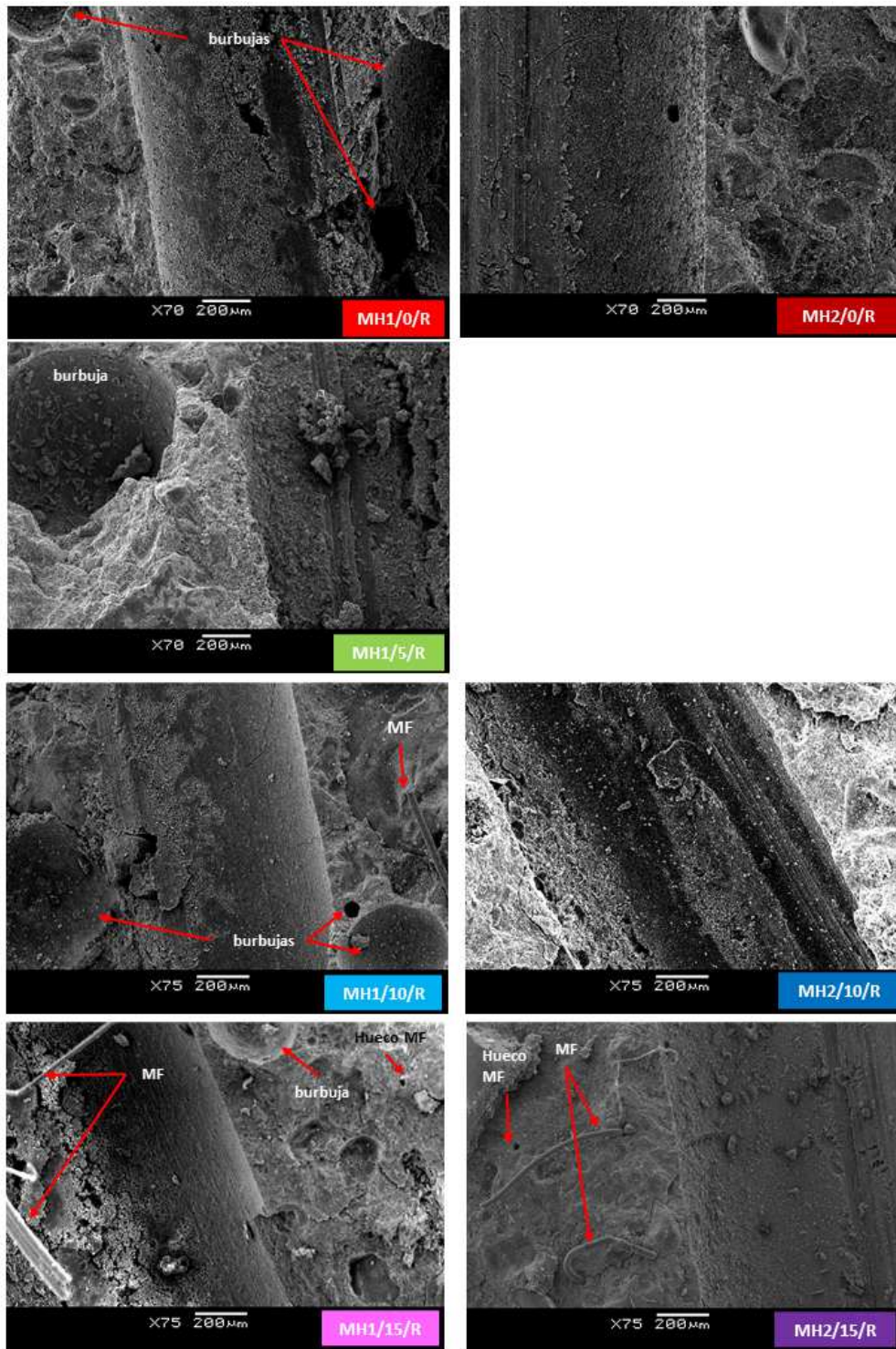


Figura 4-70. Imágenes MEB del surco dejado en la matriz por la fibra al ser arrancada.

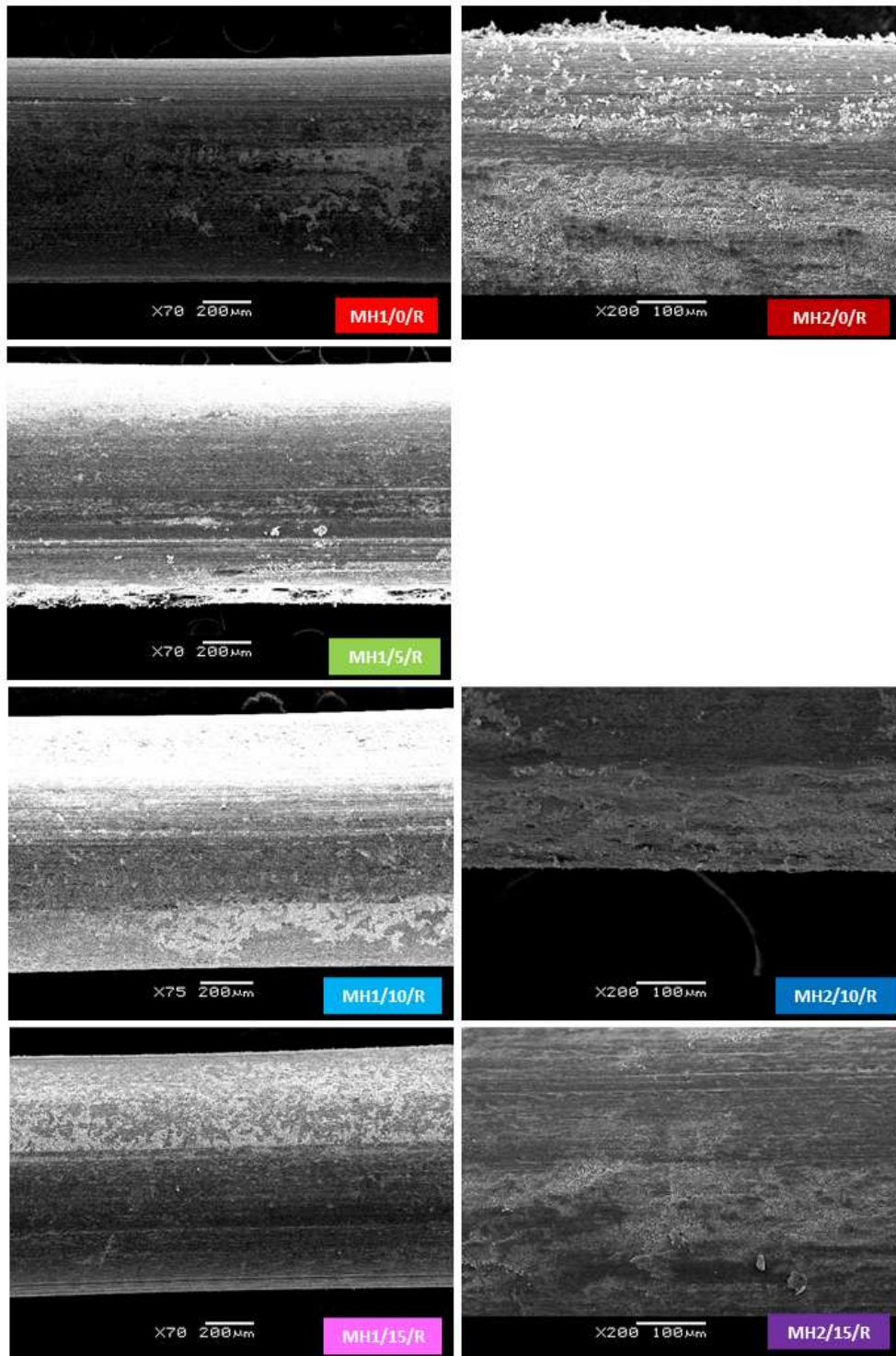


Figura 4-71. Imágenes MEB de la superficie de las fibras de acero según tipo de matriz y contenido de MF

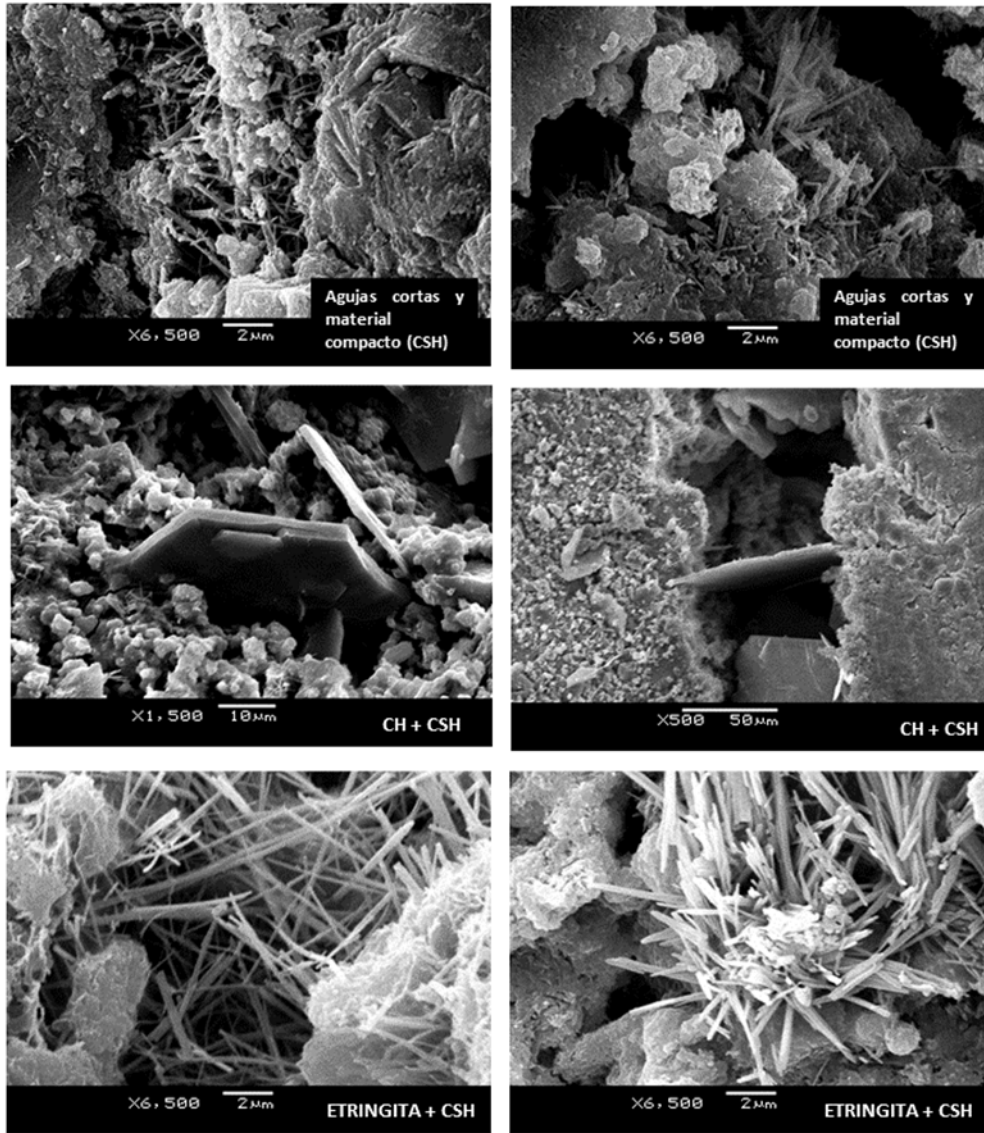


Figura 4-72. Imágenes MEB de los productos de hidratación del cemento en la matriz MH1

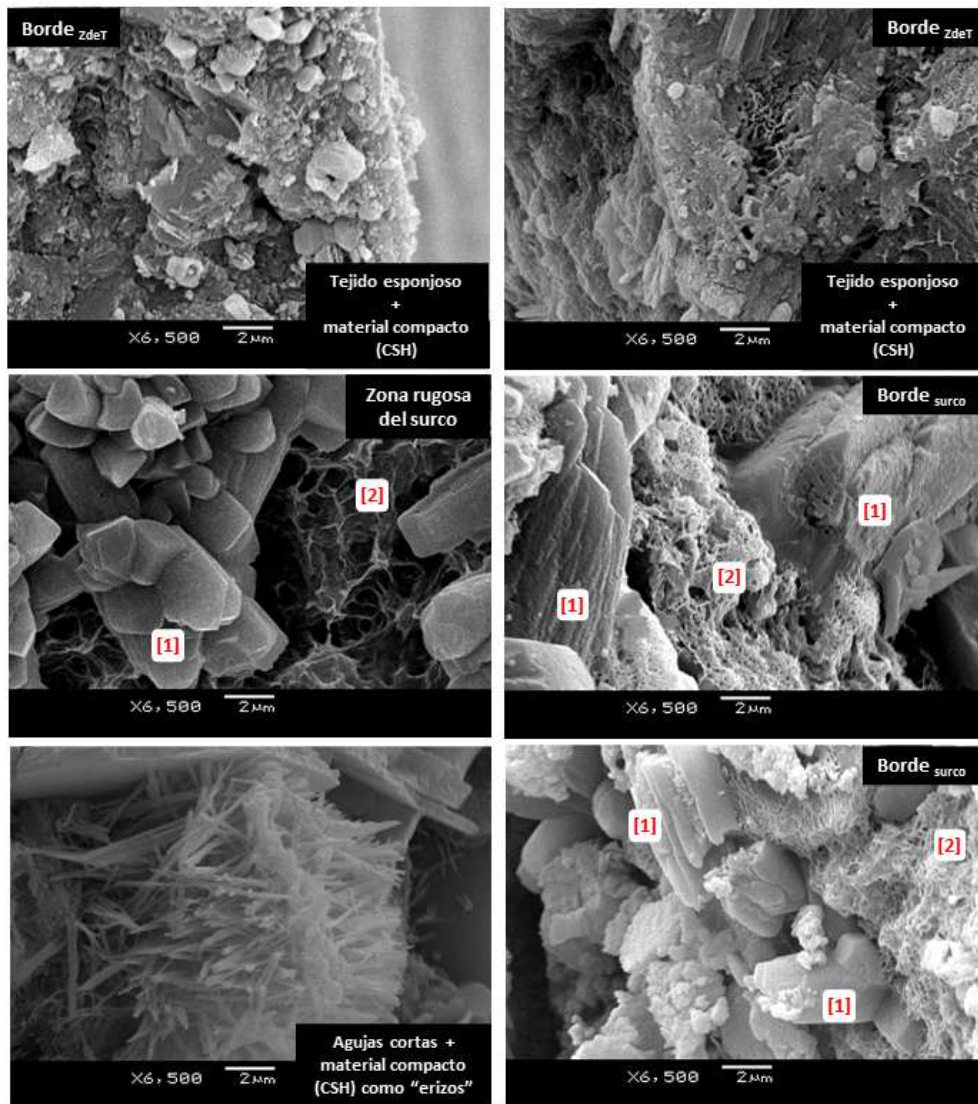


Figura 4-73. Imágenes MEB de los productos de hidratación del cemento en la matriz MH2

Además, en cuanto a la **incidencia del contenido de microfibras poliméricas en la matriz de hormigón**, se observa un mejor desempeño para el mayor porcentaje 0,15% empleado, y en algunos casos particulares también para 0,10%. Ello puede explicarse, por un lado, con lo planteado en el trabajo de (Deng et al., 2018), en cuanto a que la adición de microfibras poliméricas en la matriz de hormigón puede ayudar a unir las partículas hidratadas de cemento para formar un sistema de malla densa, lo que resulta en una estructura más compacta de compuestos alrededor de la fibra de acero, y por otro, con que también puede colaborar en el “cosido” de microfisuras que aparecen en la interfaz F-M (Figura 4-74). Todo ello redunda en una mejora en la contribución a la fuerza de unión de la interfaz F-M.

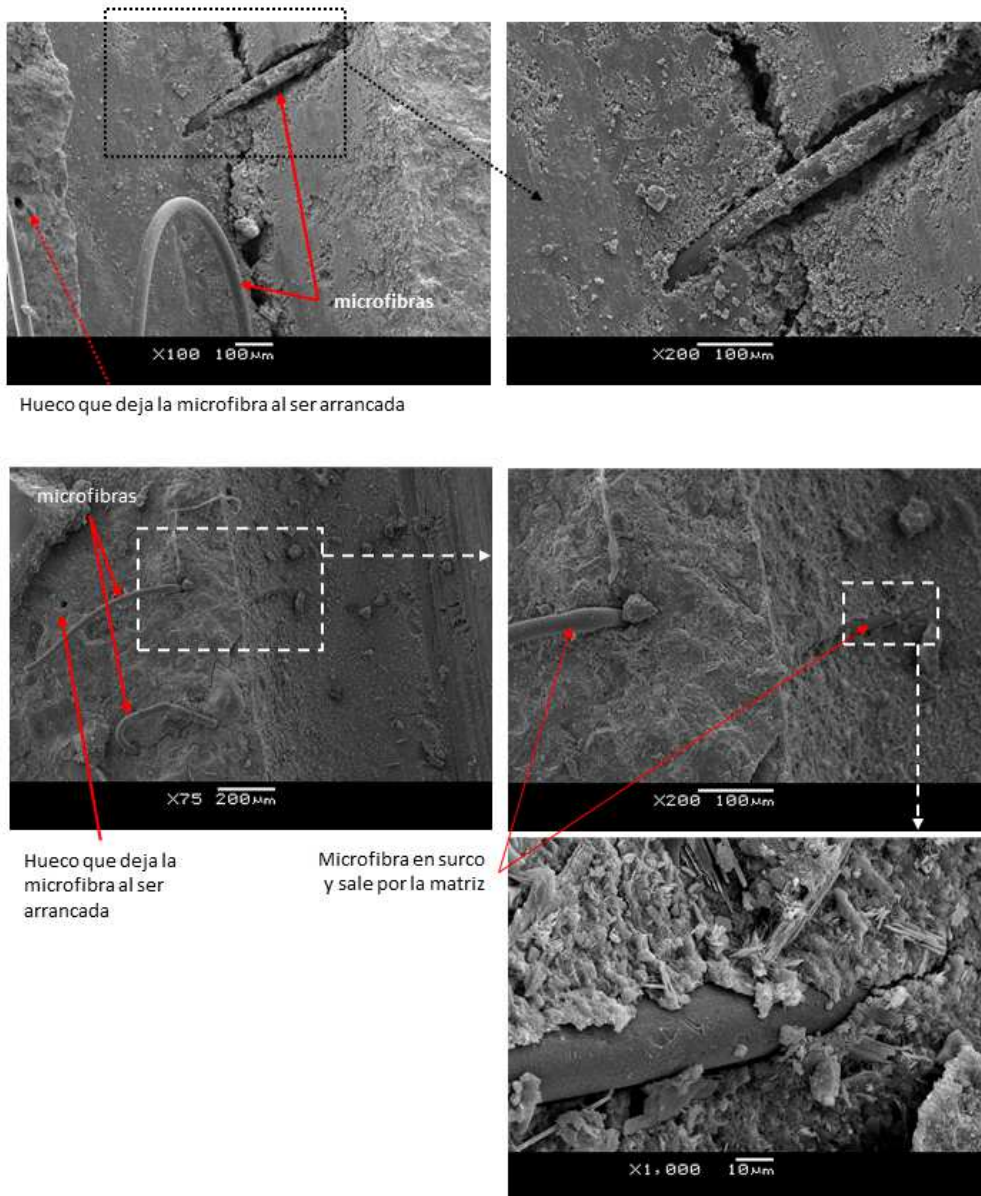


Figura 4-74. Imágenes MEB de las microfibras poliméricas en la ZdeT de la interfaz F-M

En líneas generales, estas mismas observaciones podrían aplicarse o extrapolarse a las demás configuraciones estudiadas, tanto para la fibra de acero con extremo con gancho ensayada en forma aislada, como para las configuraciones de un conjunto de fibras (con y sin gancho).

Capítulo 5 – CONCLUSIONES y PROPUESTAS A FUTURO

El objeto del presente capítulo es presentar, por un lado, las conclusiones generales y específicas del trabajo de investigación realizado y, por otro lado, plantear algunas ideas para futuras investigaciones.

5.1 CONCLUSIONES

En respuesta al objetivo general propuesto, el presente trabajo de investigación ha cumplido con el cometido de comprender los mecanismos de unión de la interfaz F-M asociados con el comportamiento de extracción por pullout de fibras de acero (aislada y en grupo) con diferentes geometrías (extremo recto y con gancho), y correlacionarlo con la microestructura y capacidad mecánica de dos tipos de matrices con diferentes contenidos de microfibras poliméricas.

En un material compuesto basado en una matriz cementicia reforzada con fibras, su buen desempeño está estrechamente ligado a la unión o interfaz entre la fibra y la matriz (F-M), por lo cual comprender los mecanismos de unión de esa interfaz permite evaluar la incidencia de diferentes parámetros involucrados con la finalidad de mejorar sus prestaciones. De allí que, la implementación del ensayo de pullout de fibras de acero embebidas en una matriz cementicia, con dos configuraciones diferentes “single-sided test” con una fibra (D1) y “double-sided test” con múltiples fibras (D2), fue el primer paso a realizar, ya que a nivel nacional no era posible la realización de dicho ensayo.

Por otra parte, se estudiaron dos matrices correspondientes a un micro-hormigón de resistencia normal (40 MPa) y un micro-hormigón de alto desempeño (60 MPa), denominadas MH1 y MH2 respectivamente, en ambos casos con incorporación de cuatro contenidos de microfibras poliméricas (0%, 0,05%, 0,10% y 0,15% MF), logrando buenos resultados de consistencia para todas las mezclas. Se fabricaron más de 160 probetas (en dos configuraciones). Se ensayaron por pullout, y el modo de falla registrado en todas las probetas siempre fue por extracción de la/s fibra/s, es decir que el elemento que falló fue la interfaz F-M. A través del análisis de la relación entre la carga de pullout vs. el desplazamiento de la fibra, se evaluaron los diferentes **mecanismos de unión de la interfaz F-M**: adherencia química, fricción, anclaje mecánico (para fibras con gancho). Se analizó la interfaz F-M a nivel microestructural mediante microscopía electrónica de barrido, procesando aproximadamente 850 imágenes MEB.

A partir de los resultados obtenidos del **análisis de la relación entre la carga de pullout vs. el desplazamiento de la fibra extraída** y de los parámetros seleccionados, se extraen las siguientes conclusiones generales:

- en la mayoría de los casos se evidencia una fuerte incidencia del **tipo de matriz** en los diferentes mecanismos de unión de la interfaz F-M, para ambos tipos de fibra y configuraciones de ensayo (D1 y D2). Las mezclas de la matriz MH2 presentan mejores resultados frente a las mezclas MH1, en cuanto a:
 - adherencia química de la interfaz F-M evaluado a partir de la pendiente del tramo lineal de la curva carga-desplazamiento y la carga máxima de adherencia (P_1 , P_2);
 - cargas máximas correspondientes al anclaje mecánico (P_{G1} y P_{G2});
 - fuerza de fricción;

- energía de pullout (E_p).
- El **efecto de la incorporación en la matriz de las microfibras poliméricas**, en cuanto al comportamiento de extracción por pullout (en comparación con las mezclas de referencia con 0%MF), en gran parte de los casos se evidencia un mejor desempeño (P_1 , P_2 , P_G , E_p) en los diferentes mecanismos de unión de la interfaz F-M para un contenido de 0,15%MF, para ambos tipos de fibra, matrices y configuraciones de ensayo D1 y D2 (salvo para el dispositivo D1 con gancho y MH1, donde no hay un efecto claro). En algunos casos particulares, también se evidencia un mejor desempeño para un contenido de 0,10%MF. La presencia de las microfibras puede ayudar a unir las partículas hidratadas de cemento para formar un sistema de malla densa, lo que resulta en una estructura más compacta de compuestos alrededor de la fibra de acero, y también puede colaborar en el “cosido” de microfisuras que aparecen en la zona. Todo ello redundando en una mejora en la contribución a la fuerza de unión de la interfaz F-M.
- según el tipo de fibra (recta o con gancho), se identificaron **diferentes etapas del comportamiento de extracción por pullout y los mecanismos de unión de la interfaz F-M** asociados a ellas:
 - Para las **fibras de acero con extremo recto** (para ambos dispositivos D1 y D2) se identificaron 3 etapas: (1) etapa totalmente unida donde prevalece la adherencia química entre F-M; (2) etapa de desprendimiento donde la interfaz F-M se daña parcialmente, y ocurre el pico de adherencia química y en forma conjunta comienza a actuar la fuerza de fricción entre F-M; (3) etapa de deslizamiento por fricción, ocurre el desprendimiento total entre F-M.
 - Para las **fibras de acero con extremo con gancho** (para ambos dispositivos D1 y D2) se identificaron 5 etapas: (1) Etapa elástica y de desprendimiento parcial: prevalece la fuerza de adhesión química en la interfaz F-M y ocurre el pico de adherencia química; (2) Primera etapa de deformación plástica: se alcanza una primera carga máxima por anclaje mecánico (P_{G1}); (3) Segunda etapa de deformación plástica: después de un descenso, la carga de extracción por pullout alcanza la segunda carga máxima por anclaje mecánico (P_{G2}); (4) Etapa híbrida deformación-deslizamiento: en forma conjunta actúan la fuerza de fricción y la deformación plástica decreciente; (5) Etapa de deslizamiento por fricción, ocurre el desprendimiento total entre F-M.

En particular, en el análisis del **mecanismo de unión por adherencia química de la interfaz F-M** analizado en una fibra aislada, se observó un comportamiento diferenciado según el tipo de matriz en las etapas 1 y 2. Mientras que para las muestras de matriz MH1 se produce una sola carga máxima (P_1) de adherencia química, para las mezclas MH2 se producen dos cargas máximas (P_1 y P_2). En relación con ello, en ambas mezclas la carga máxima P_1 se produce en la misma zona, siendo que la matriz MH2 presenta valores mayores. En cambio, para la matriz MH2, a partir del valor de P_1 (primer pico de adherencia química) la carga comienza a aumentar nuevamente hasta alcanzar una segunda carga máxima (P_2). Este comportamiento se repite tanto para la fibra de acero con extremo recto como con extremo con gancho cuando se analizan en forma aislada, sin embargo, este comportamiento no se observó cuando se estudió el conjunto de 16 fibras (rectas o con gancho). Se entiende que esta diferencia entre la matriz MH1 y MH2 puede corresponder a una conjunción de dos de los mecanismos de unión de la interfaz

F-M: por un lado, a la adherencia química de la interfaz F-M parcialmente dañada y por otro a la fuerza de fricción, ambas actuando en forma conjunta. En cuanto a las causas que pueden haber detrás de este comportamiento diferenciado entre ambas matrices se podría explicar porque la matriz MH2 es más fuerte que la MH1, por contener mayor cantidad de cemento y una relación agua-cemento menor que provoca una mayor resistencia a compresión y a tracción del hormigón (resistiendo mejor los esfuerzos internos de tracción que se producen en la matriz que rodea la fibra de acero). Ello concuerda con las evidencias encontradas en **el análisis a escala microestructural** de las imágenes MEB, ya que

- la matriz MH1 presenta mayor cantidad de huecos y/o burbujas de aire conformando así una matriz más porosa con mayor presencia de productos de hidratación tales como hidróxido de calcio y de etringita.
- la matriz MH2 presenta un aspecto más compacto y denso (pocos huecos y casi sin burbujas de aire) con presencia de productos de hidratación que se visualizan como grupos de cristales más compactos y una estructura de tejido “esponjoso” que da unión al conjunto. Lo cual es lógico dado el alto contenido de cemento y baja relación agua/cemento que fuerza a que las partículas estén más próximas entre sí.

Todo ello conduce a un aumento de la fuerza de unión química entre la fibra y la matriz que se evidencia en las imágenes MEB en una mayor cantidad de matriz MH2 adherida en la superficie de las fibras de acero arrancadas, así como en una mayor cantidad de matriz arrancada de la superficie del surco.

En las configuraciones de ensayo donde se utilizó fibras de acero con ganchos en los extremos, **el mecanismo que domina es el anclaje mecánico que ofrece el gancho**, teniendo una incidencia mucho mayor en las cargas de pullout alcanzadas. Los valores de carga máxima por anclaje mecánico (P_{G1} y P_{G2}) son mayores para las mezclas de la matriz MH2 que para las de MH1. Además, estos puntos máximos son más pronunciados para las mezclas de MH2, siendo mayores las caídas de carga entre ellos lo cual permite visualizarlos en la curva carga-desplazamiento con mayor claridad. En el caso de las mezclas de MH1, al ser una matriz menos resistente y menos compacta, la caída de carga entre ellos no es tan pronunciada, lo que se visualiza en curvas carga-desplazamiento más achatadas.

En cuanto al **deslizamiento por fricción** se observaron comportamientos similares

- Para las **fibras de acero con extremo recto** (para ambos dispositivos D1 y D2), se observó que, una vez alcanzada el pico de carga máxima de adherencia química, la carga descende abruptamente hasta determinado valor y a partir de allí hay un comportamiento diferente de la fuerza de fricción según el dispositivo.
 - En el caso de la fibra aislada (D1) después de la caída de la carga ésta se mantiene constante hasta el final.
 - En el caso del conjunto de 16 fibras (D2) después de la caída de la carga ésta aumenta hasta cierto valor, y a partir de allí permanece prácticamente constante hasta el final del ensayo. Incluso para algunas mezclas ese valor llega a superar el pico de carga máxima de adherencia química.
- Para las **fibras de acero con extremo con gancho** (para ambos dispositivos D1 y D2) se observó que una vez superadas las cargas máximas correspondientes al anclaje mecánico del gancho (P_{G1} , P_{G2}), a partir de allí la carga va descendiendo gradualmente y luego se mantiene constante hasta el final.

5.2 PROPUESTAS A FUTURO

Para profundizar en el conocimiento del tema abordado, quedan otros aspectos que serían convenientes considerar para futuras líneas de investigación.

Un posible abordaje, sería profundizar en la búsqueda en la mejora de los mecanismos de unión de la interfaz F-M, contemplando todos los materiales involucrados y la interacción entre ellos, como ser:

1. **Mejorar la microestructura de la matriz:** como por ejemplo con el uso de materiales cementicios suplementarios, filleres y aditivos, que densifiquen la microestructura de la matriz cementicia, buscando un mejor desempeño en los productos de hidratación obtenidos y menor porosidad, en busca del mejoramiento de la ZdeT entre F-M;
2. Profundizar en la incorporación en la matriz de distintos tipos y contenidos de **microfibras**, que mejoren el desempeño, ya que como se observó en la campaña experimental, se lograba un mejor desempeño en el comportamiento en pullout con los mayores contenidos de microfibra;
3. **Profundizar en la caracterización a microescala de la matriz** con empleo de **técnicas complementarias** como, por ejemplo, la identificación de compuestos químicos que identifican los productos de hidratación (DRX, FRX) y análisis de la porosidad de la matriz (MIP). A partir de esos datos, correlacionar con las imágenes MEB y con la resistencia de la unión F-M;
4. Analizar distintos aspectos de las **fibras de acero** (como tratamiento superficial para lograr mejor adherencia con la matriz, diferentes geometrías);
5. Evaluar **aspectos de durabilidad** en los HRF, asociado a las propuestas de mejora del desempeño de la matriz;

Por otra parte, sería interesante ampliar la campaña experimental al análisis en hormigones con agregado grueso, y a partir de ello poder correlacionar el desempeño mecánico de los HRF (analizando la resistencia a la tracción por flexión según norma UNE-EN 14651) con los resultados del ensayo de pullout de fibras y las observaciones a nivel microestructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, Y. M., & Iqbal Khan, M. (2016). Fiber–Matrix Interactions in Fiber-Reinforced Concrete: A Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1183–1198. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2099-1>
- Abdallah, S., Fan, M., & Rees, D. W. A. (2017). Effect of elevated temperature on pull-out behaviour of 4DH/5DH hooked end steel fibres. *Composite Structures*, 165, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.005>
- Abu-Lebdeh, T., Hamoush, S., Heard, W., & Zornig, B. (2011). Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites. *Construction and Building Materials*, 25(1), 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.059>
- ACI Committee 544. (1996). *544.1R-96: Report on Fiber Reinforced Concrete (Reapproved 2009)*. American Concrete Institute.
- Aitcin, P. C. (2000). Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 1349-1359, 30, 1349–1359.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Ferreras, A. (2016). Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes. *Construction and Building Materials*, 112, 607–622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.128>
- Balzamo, H., Bascoy, D., Bonavetti, V., Cabrera, O., Carrasco, M. F., Clariá, M. A., Di Maio, A., Checmarew, R., Eperjesi, L., Fornasier, G., Irassar, E., López, R., Maldonado, N., Oshiro, A., Rahhal, V., Sota, J., Traversa, L., Zega, C., & Zerbino, R. (2012). *Ese material llamado hormigón* (N. G. Maldonado & M. F. Carrasco (eds.)). Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- Beglarigale, A., & Yazıcı, H. (2015). Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. *Construction and Building Materials*, 75, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.037>
- Carroll et al. (2006). China Central Television Headquarters - Structural Design. *Steel Structures*, 6, 387–391. https://www.xiaonianduan.com/media/China_Central_Television_Headquarters_-_Structural_Design.pdf
- Chan, Y.-W., & Chu, S.-H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1167–1172. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>
- Deng, F., Ding, X., Chi, Y., Xu, L., & Wang, L. (2018). The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling. *Composite Structures*, 206, 693–712. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.066>
- Destrée, X., & Mandl, J. (2008). Steel fibre only reinforced concrete in free suspended elevated slabs: Case studies, design assisted by testing route, comparison to the latest SFRC standard documents. *Proceedings of the International FIB Symposium 2008 - Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for Our Society*, 111.
- Enfedaque, A., Alberti, M. G., Paredes, J. A., & Gálvez, J. C. (2017). Interface properties of polyolefin fibres embedded in self-compacting concrete with a bond improver admixture. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 90, 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2017.06.015>
- Franus, W., Panek, R., & Wdowin, M. (2015). *SEM Investigation of Microstructures in Hydration Products*

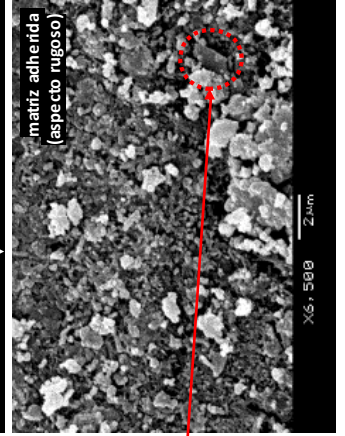
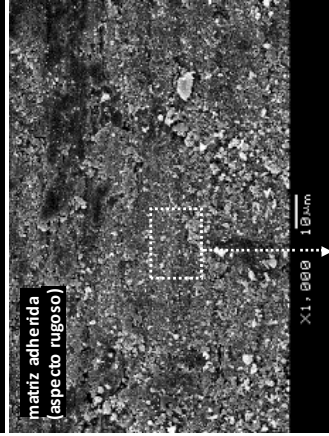
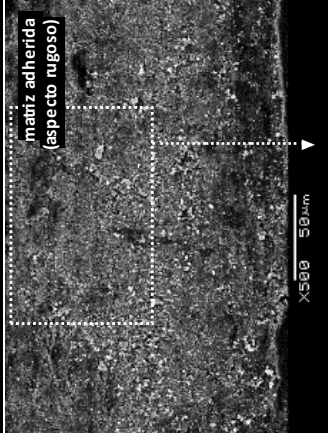
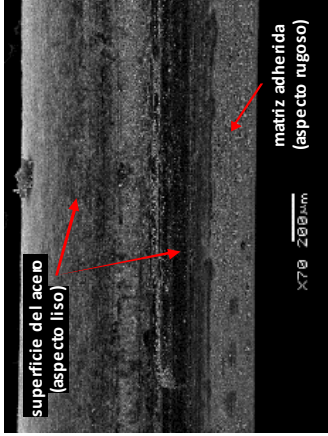
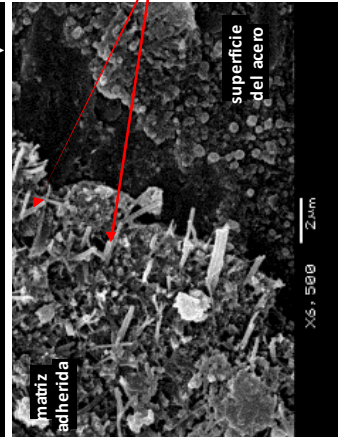
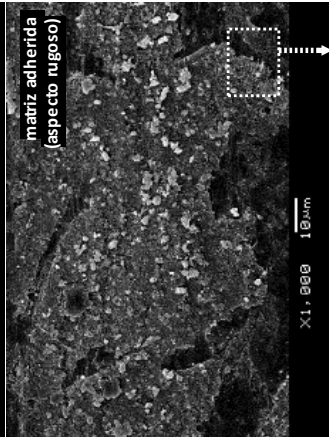
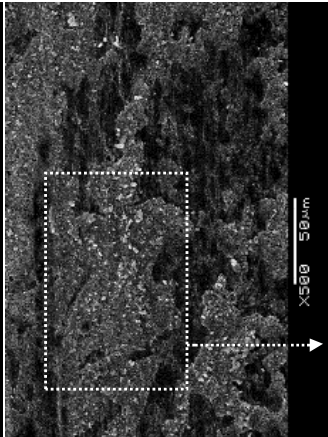
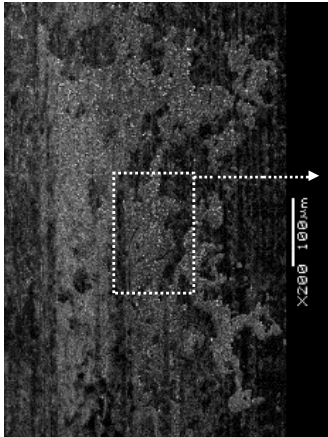
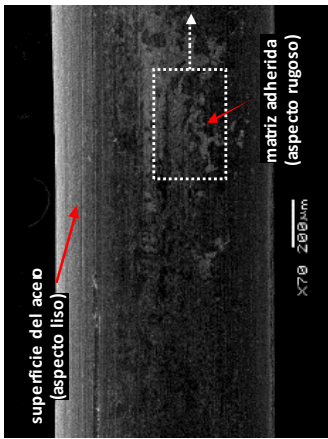
- of Portland Cement (pp. 105–112). https://doi.org/10.1007/978-3-319-16919-4_14
- García-Gasco Lominchar, S., Mas Llorens, V., & Sáez-Bravo Picón, E. (2009). *Piel de Hormigón. Aspectos técnicos y estéticos del hormigón autocompactante*. General de Ediciones de Arquitectura SRL, Valencia - ISBN: 978-84-93-72-21-1-1.
- Gray, R. J. (1983). Experimental techniques for measuring fibre/matrix interfacial bond shear strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 3(4), 197–202. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(83\)90094-5](https://doi.org/10.1016/0143-7496(83)90094-5)
- International Federation for Structural Concrete (fib). (2010). *Fib Model Code for Concrete Structures 2010* (Ernst & Sohn (ed.); 1st ed.).
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Lee, Y., Kang, S.-T., & Kim, J.-K. (2010). Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2030–2041. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.009>
- Li, V. C., Wu, H.-C., & Chan, Y.-W. (2005). Effect of Plasma Treatment of Polyethylene Fibers on Interface and cementitious Composite Properties. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(3), 700–704. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb07932.x>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2013). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. Mc. Graw Hill Profesional.
- Ministerio de Fomento. (2011). *Instrucción de Hormigon Estructural. EHE-08*. (Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica (ed.); 5th ed.).
- Nieuwoudt, P. D., & Boshoff, W. P. (2017). Time-dependent pull-out behaviour of hooked-end steel fibres in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 79, 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.006>
- Serna, P., López, J. Á., Coll, H., Camacho, E., Navarro-Gregori, J., & Galán, F. (2015). Pasarela de hormigón de muy alto rendimiento sobre el Barranco de las Ovejas (Alicante). *Hormigón y Acero*, 66(275), 23–42. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2014.12.001>
- Shaikh, F. U. A., Shafaei, Y., & Sarker, P. K. (2016). Effect of nano and micro-silica on bond behaviour of steel and polypropylene fibres in high volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 115, 690–698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.090>
- Simões, T., Octávio, C., Valença, J., Costa, H., Dias-da-Costa, D., & Júlio, E. (2017). Influence of concrete strength and steel fibre geometry on the fibre/matrix interface. *Composites Part B: Engineering*, 122, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.04.010>
- Singh, H. (2017). *Steel Fiber Reinforced Concrete*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2507-5>
- Singh, S., Shukla, A., & Brown, R. (2004). Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1919–1925. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.014>
- Soulioti, D. V., Barkoula, N.-M., Koutsianopoulos, F., Charalambakis, N., & Matikas, T. E. (2013). The effect of fibre chemical treatment on the steel fibre/cementitious matrix interface. *Construction and Building Materials*, 40, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.111>
- Tarifa, M., Poveda, E., Cunha, V. M. C. F., & Barros, J. A. O. (2020). Effect of the displacement rate and inclination angle in steel fiber pullout tests. *International Journal of Fracture*, 223(1–2), 109–122. <https://doi.org/10.1007/s10704-019-00398-2>
- Tzevelekou, T., Lampropoulou, P., Giannakopoulou, P. P., Rogkala, A., Koutsovitis, P., Koukouzas, N., & Petrounias, P. (2020). Valorization of Slags Produced by Smelting of Metallurgical Dusts and

Lateritic Ore Fines in Manufacturing of Slag Cements. *Applied Sciences*, 10(13), 4670.
<https://doi.org/10.3390/app10134670>

- Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2018). How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC? *Cement and Concrete Composites*, 90, 193–201.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.021>
- Wu, Z., Shi, C., & Khayat, K. H. (2016). Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). *Cement and Concrete Composites*, 71, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.005>
- Wu, Z., Shi, C., & Khayat, K. H. (2018). Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO₃ particles. *Cement and Concrete Composites*, 86, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.014>
- Zhang, L., Zhao, J., Fan, C., & Wang, Z. (2020). Effect of Surface Shape and Content of Steel Fiber on Mechanical Properties of Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–11.
<https://doi.org/10.1155/2020/8834507>
- Zile, E., & Zile, O. (2013). Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers. *Cement and Concrete Research*, 44, 18–24.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.014>

ANEXO A

A continuación, se presentan Fichas con la totalidad de imágenes MEB tomadas, tanto de las muestras de cada tipo de matriz (MH1 y MH2) con los diferentes contenidos de microfibra polimérica (0%, 0,05%, 0,10%, 0,15%), así como de las correspondientes fibras de acero con extremo recto arrancadas.



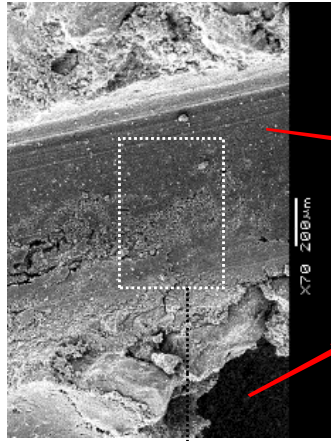
Sobre la superficie de la fibra aramcada se observan dos zonas diferentes:

- Restos de matriz adherida a la superficie de la fibra (aspecto rugoso)
- Superficie del acero sin matriz adherida (aspecto liso)

Formas que se observan en la matriz adherida:

- Cristales en forma de agujas cortas (CSH)
- Cristales en forma de placas hexagonales (CH)
- Granos de diferentes tamaños

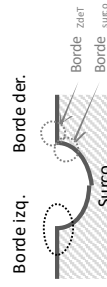
Figura A-1. Imágenes MEB de la fibra - MH1/0/R



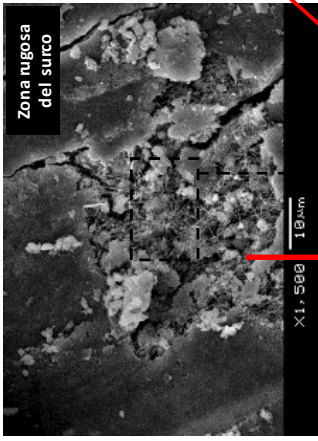
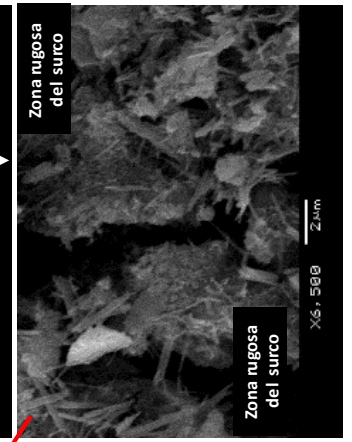
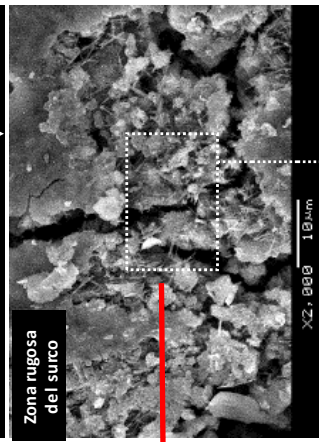
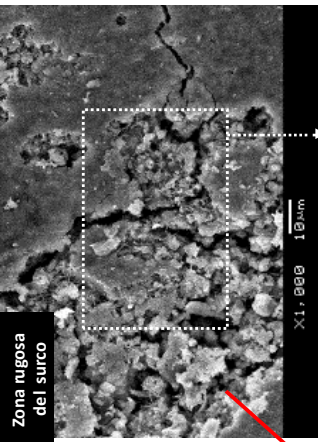
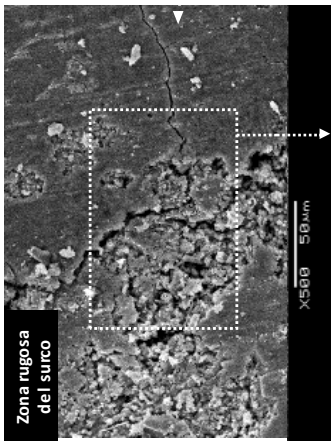
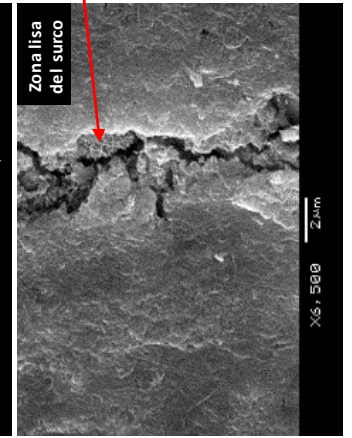
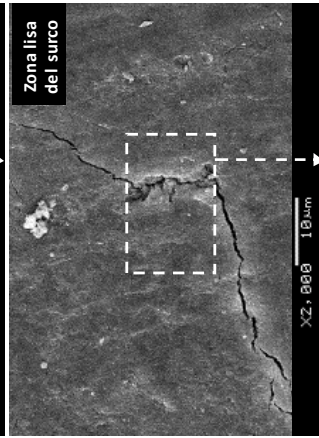
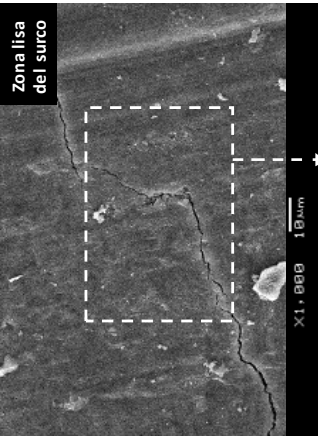
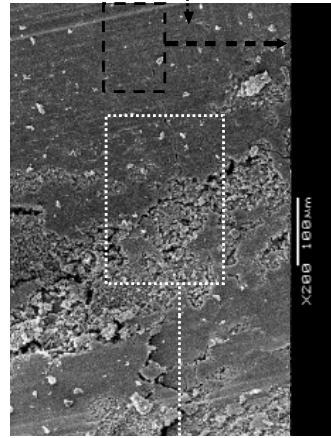
Burbujas de aire de diferente tamaño en ZdeI

En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa** e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- **Zona lisa** y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero. Además se observan fisuras.



Zona lisa del surco:
En los bordes de la fisura se observan formas de agujas cortas de CSH transformadas en una estructura "esponjosa"



En la **zona rugosa del surco**, donde la matriz fue arrancada, se observan algunos cristales en forma de agujas cortas (CSH) saliendo de los granos sólidos de diferentes tamaños formando "erizos". También se observan fisuras y zonas huecas

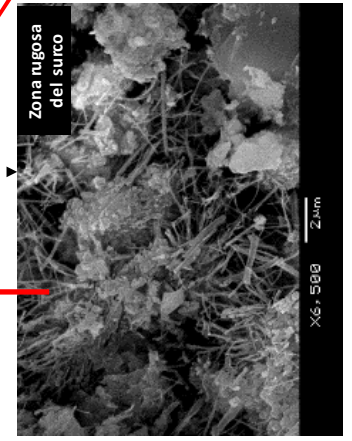


Figura A-2. Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R

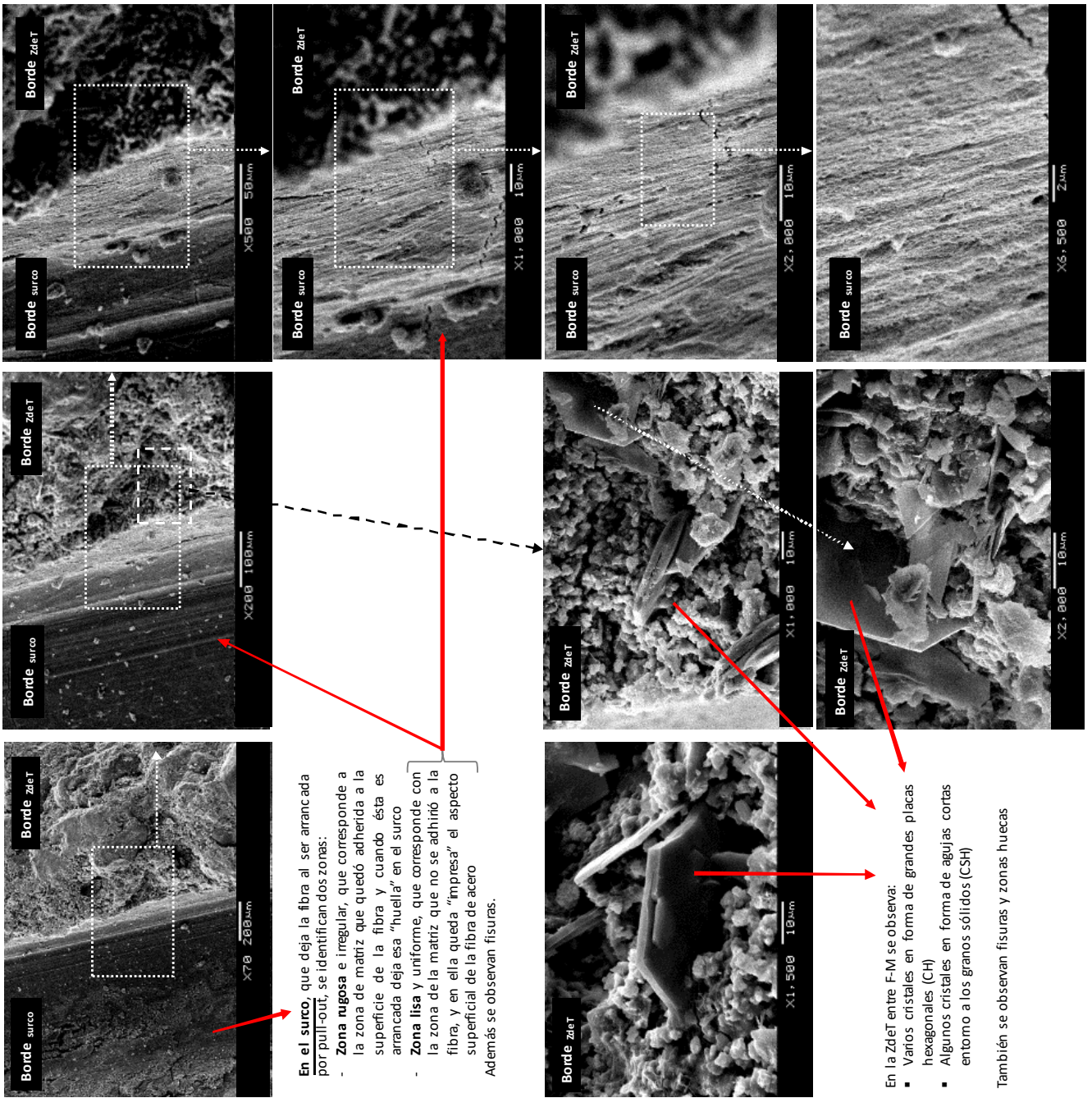


Figura A-3. Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R

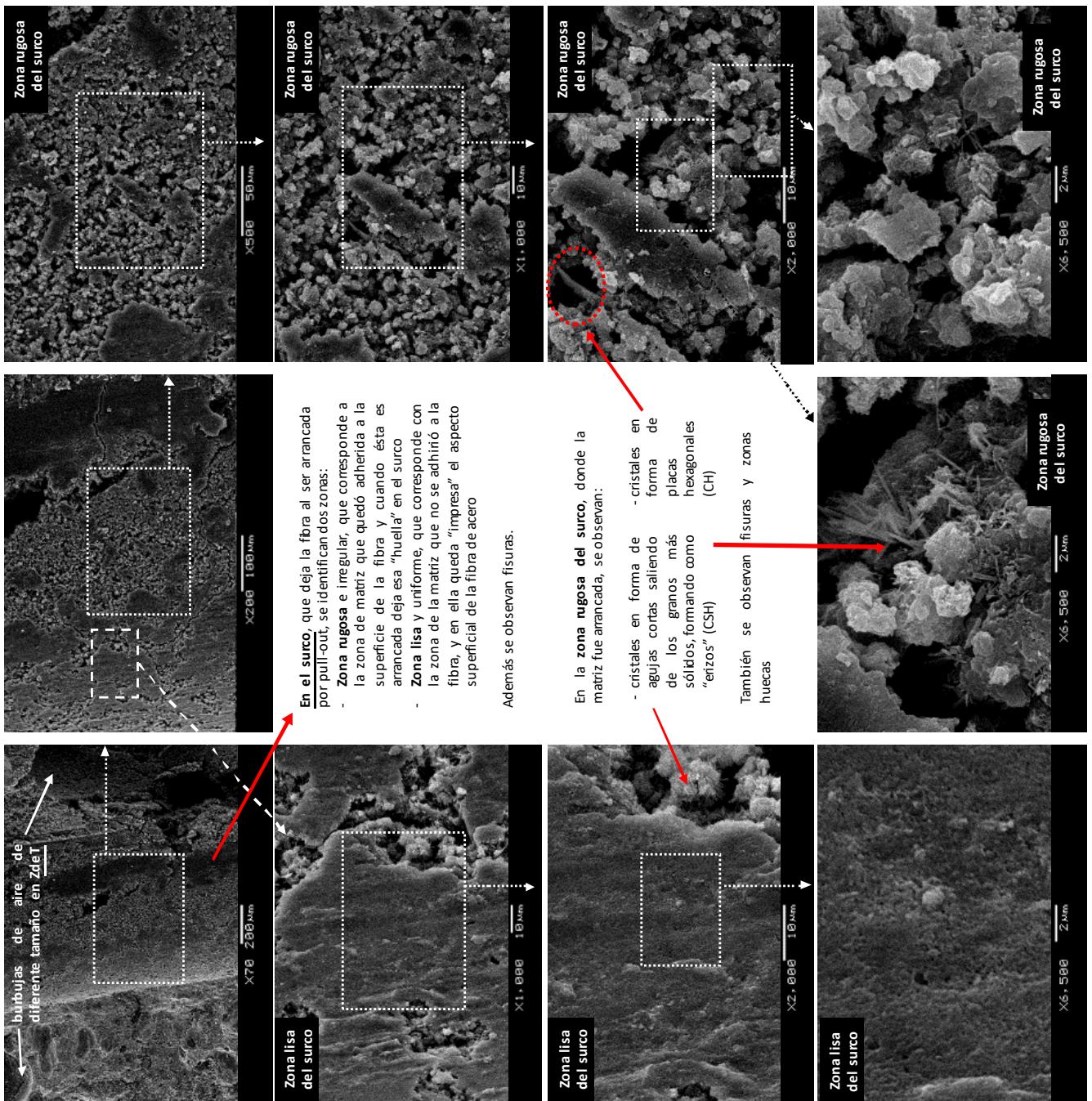
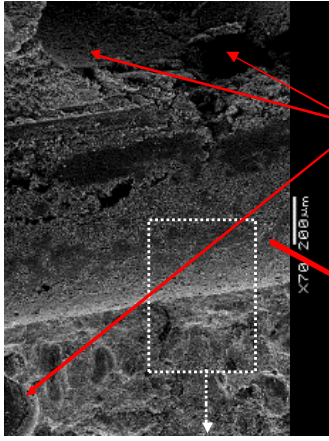


Figura A-4. Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R

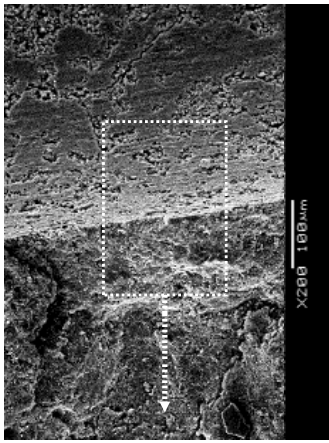
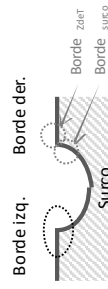


Burbujas de aire de diferente tamaño en **ZdeT**

En el **surco**, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa e irregular**, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- **Zona lisa y uniforme**, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras y huecos.



El **borde del surco** se ve lateralmente, y en el interior de las pequeñas zonas donde la matriz fue arrancada pueden observarse cristales en forma de agujas cortas entomo a los granos sólidos (CSH)

En la **ZdeT entre F-M** se observan cristales en forma de agujas cortas entomo a los granos sólidos (CSH), formando como "erizos"

También se observan fisuras y zonas huecas

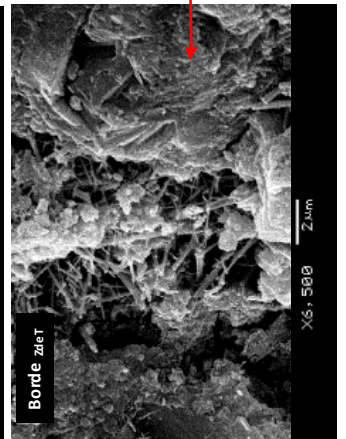
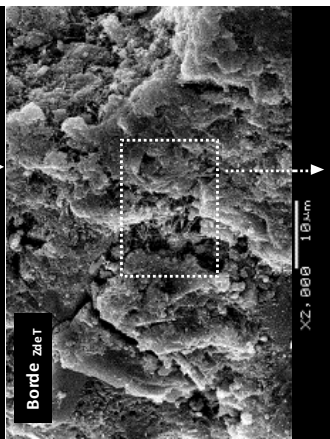
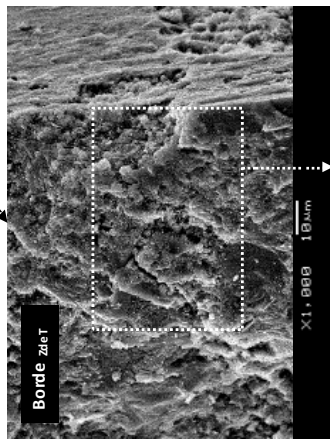
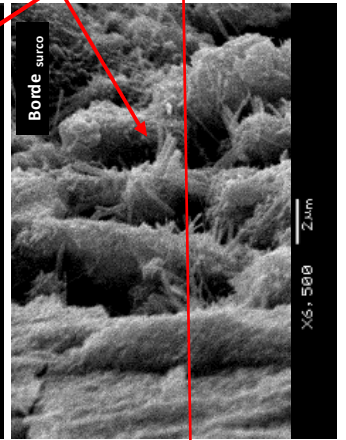
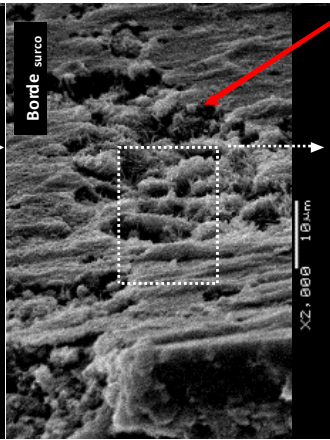
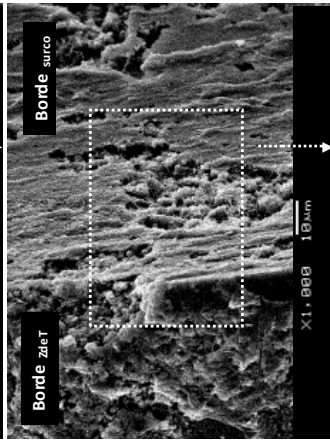
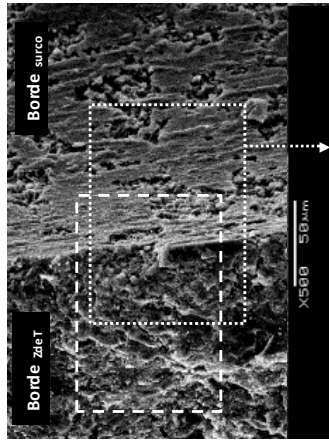
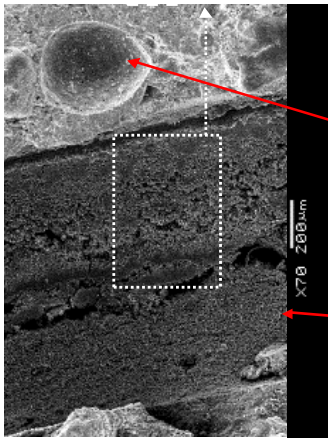


Figura A-5. Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R

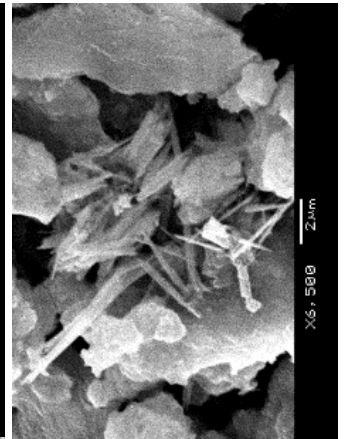
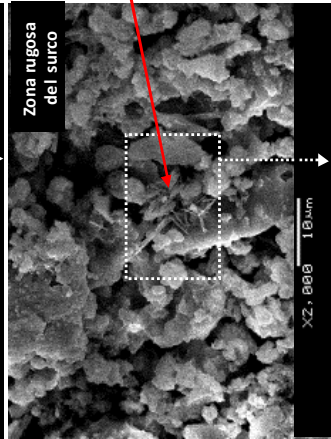
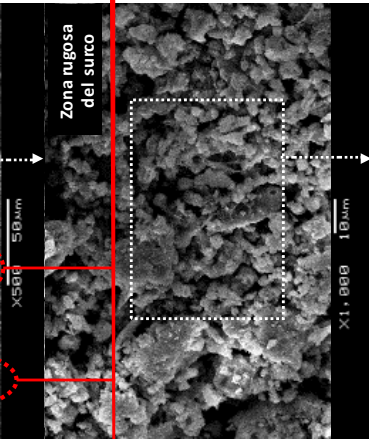
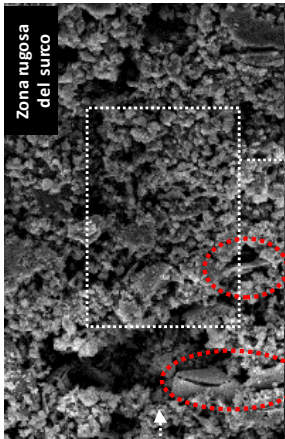
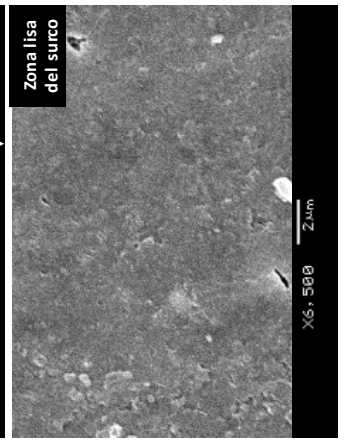
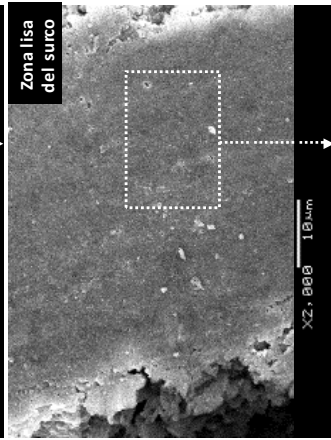
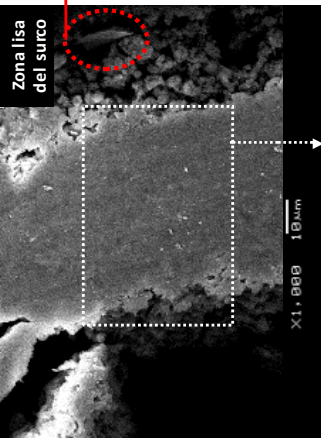
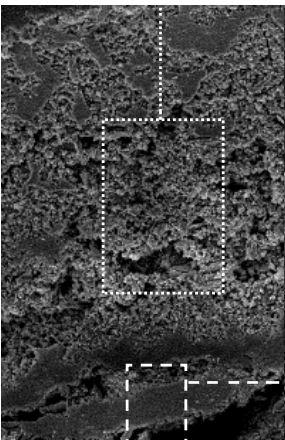


Burbujas de aire de diferente tamaño en **ZdeT**

En el **surco**, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa** e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- **Zona lisa** y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras y huecos.

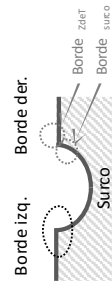


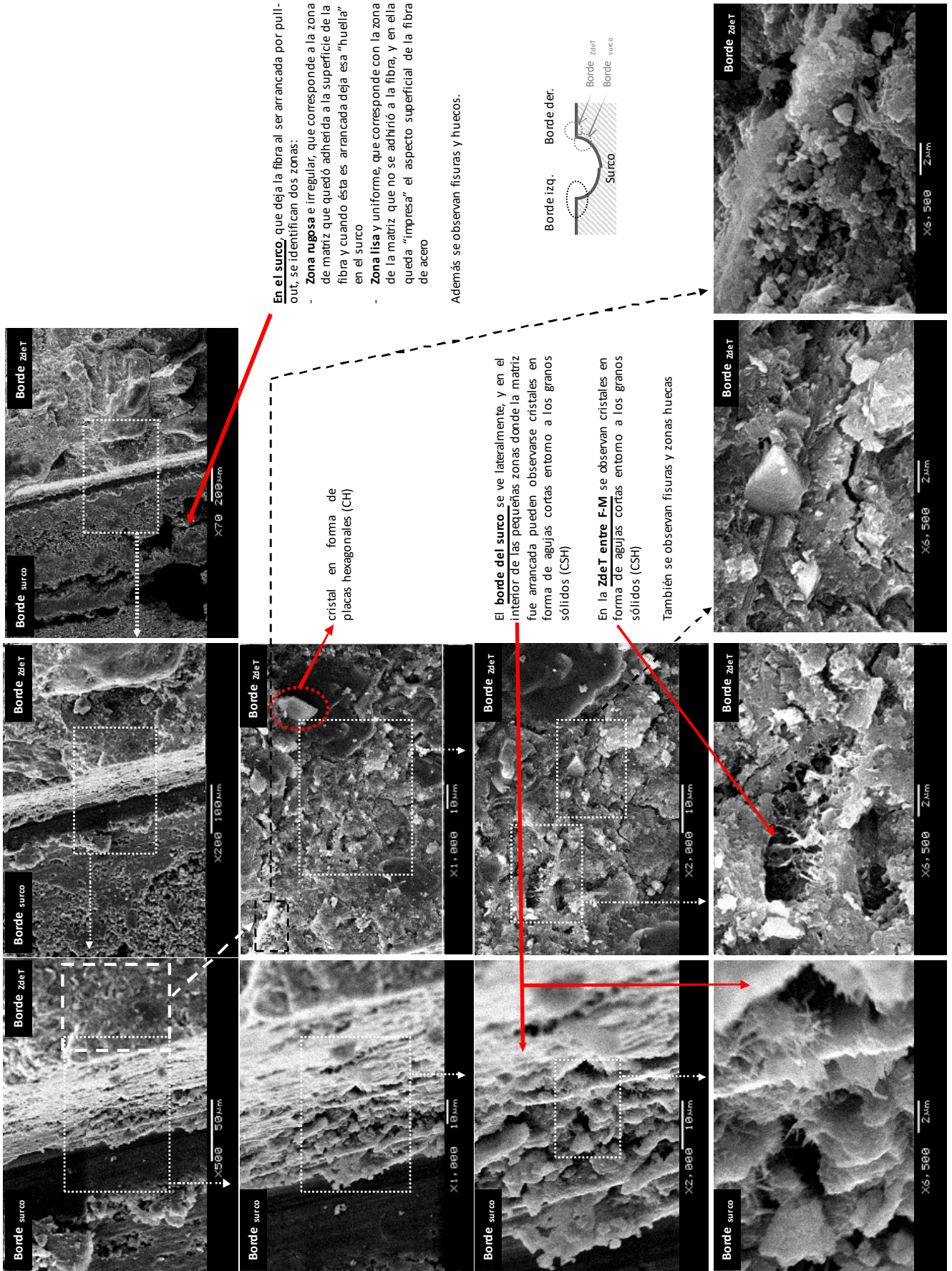
cristales en forma de placas hexagonales (CH)

En la **zona rugosa del surco**, donde la matriz fue arrancada, se observan:

- cristales en forma de agujas cortas saliendo de los granos sólidos (CH)
- Algunos cristales en forma de placas hexagonales (CH)

También se observan fisuras y zonas huecas

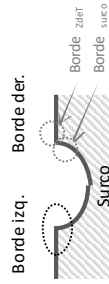




En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- Zona rugosa e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- Zona lisa y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras y huecos.



cristal en forma de placas hexagonales (CH)

El borde del surco se ve lateralmente, y en el interior de las pequeñas zonas donde la matriz fue arrancada pueden observarse cristales en forma de agujas cortas entorno a los granos sólidos (CSH)

En la ZleT entre F-M se observan cristales en forma de agujas cortas entorno a los granos sólidos (CSH)

También se observan fisuras y zonas huecas

Figura A-7. Imágenes MEB de la matriz MH1/0/R

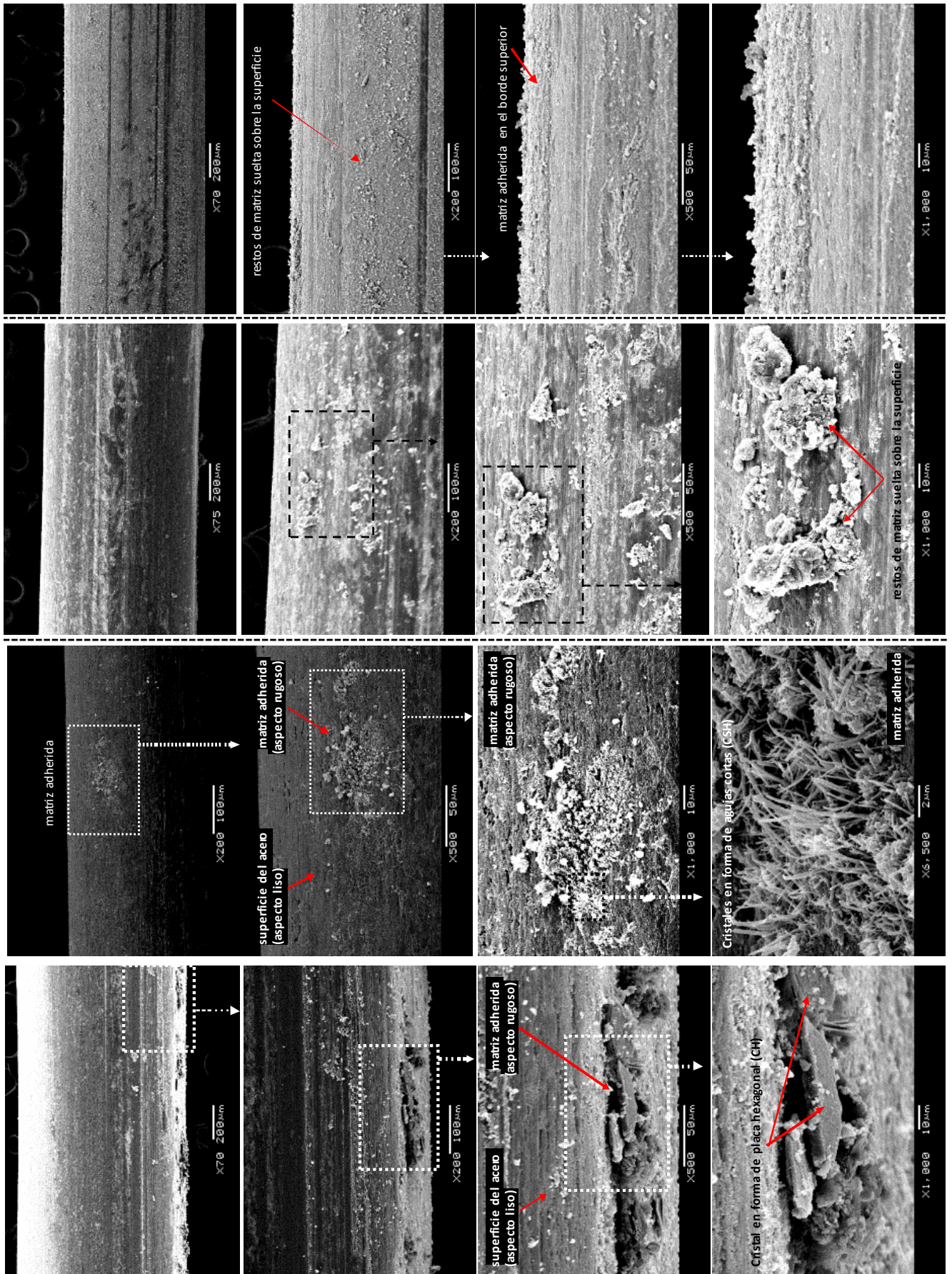


Figura A-8. Imágenes MEB de la fibra MH1/5/R

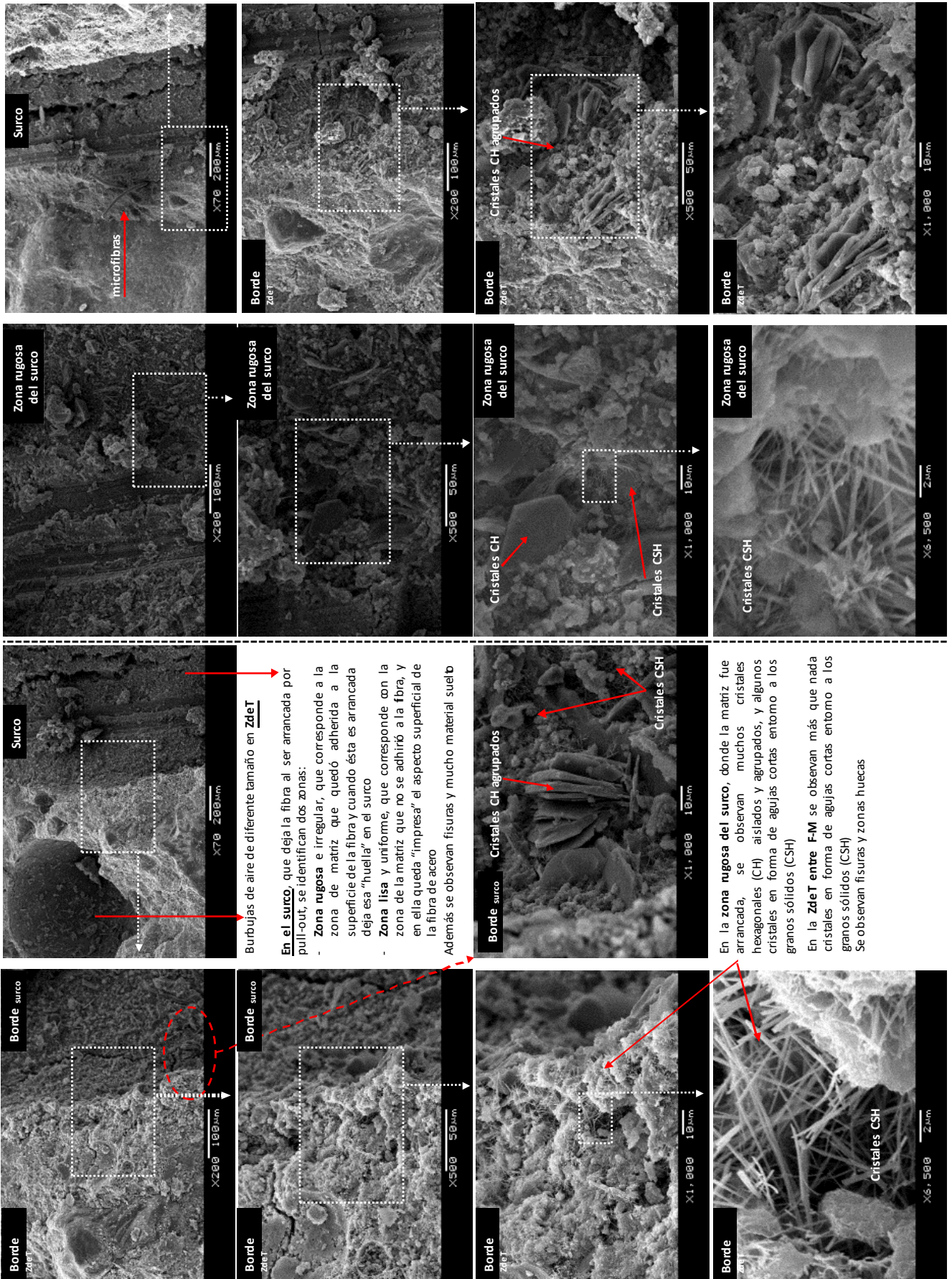


Figura A-9. Imágenes MEB de la matriz MH1/5/R

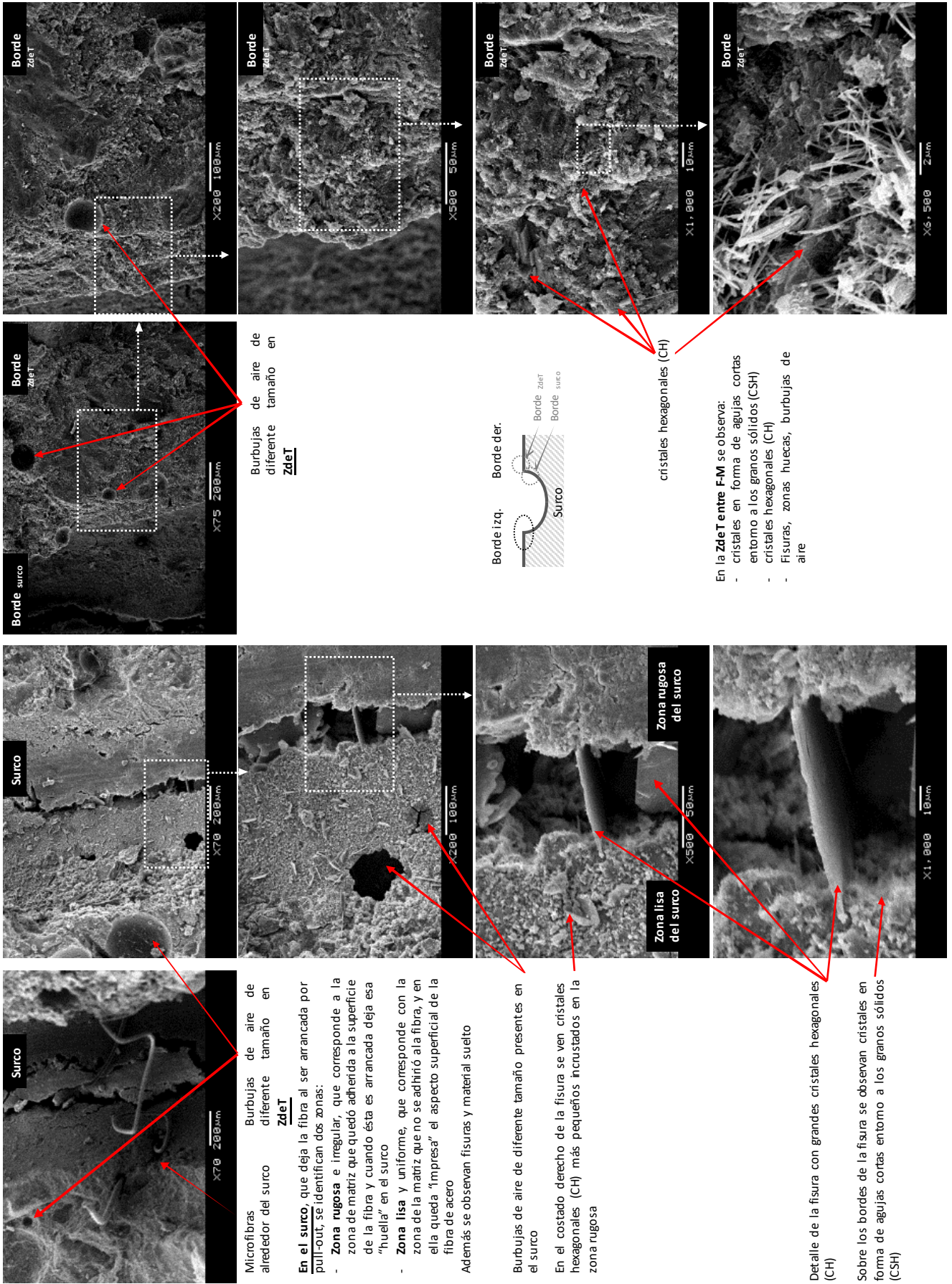
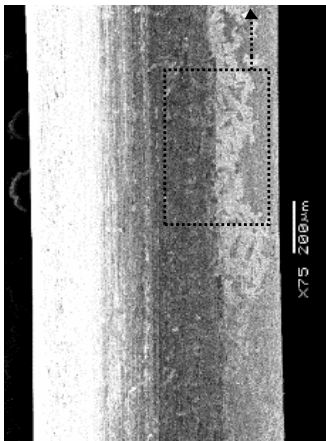
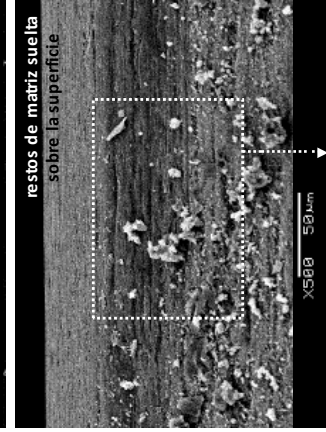
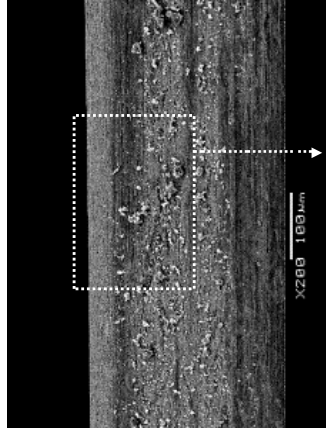
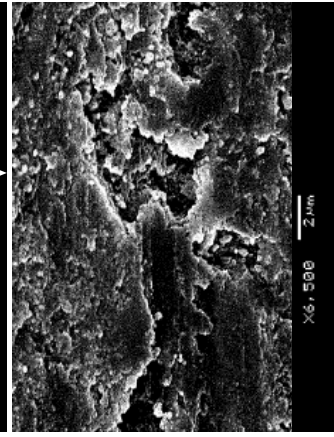
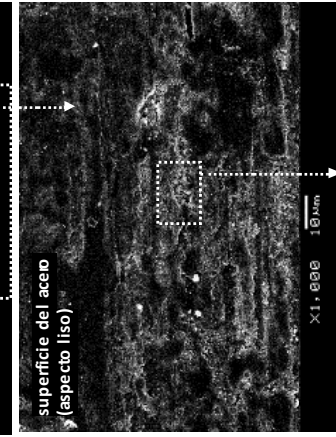
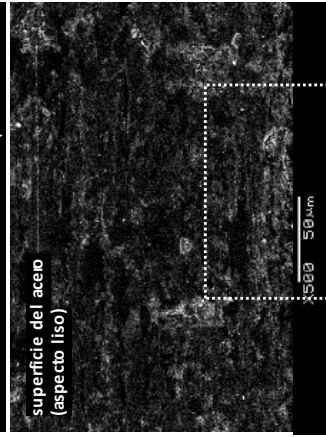
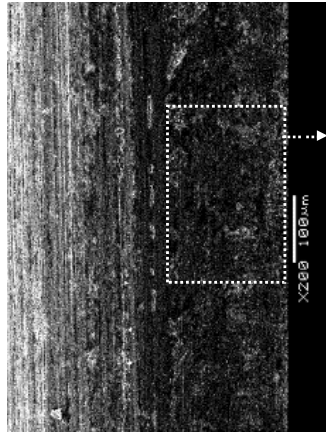
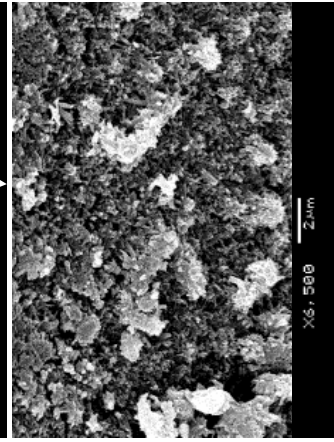
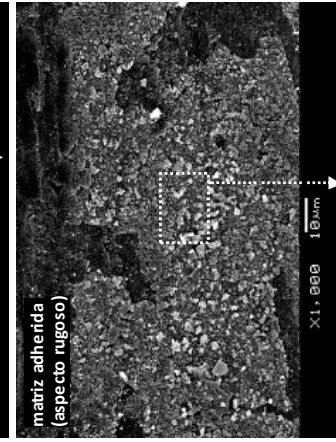
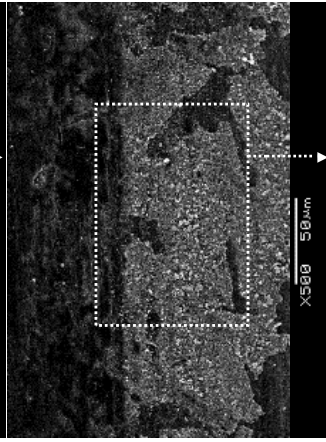
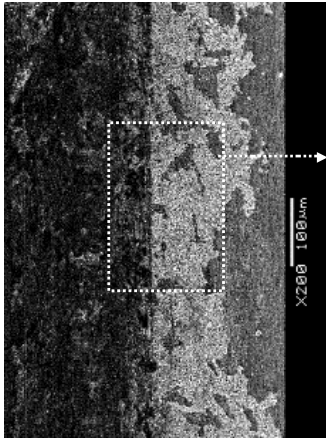


Figura A-10. Imágenes MEB de la matriz MH1/5/R



Sobre la superficie de la fibra arrancada se observan dos zonas diferentes:

- Restos de matriz adherida a la superficie de la fibra (aspecto rugoso)
- Superficie del acero sin matriz adherida (aspecto liso)



Superficie irregular del acero

Figura A-11. Imágenes MEB de la fibra MH1/10/R

Formas que se observan en la matriz adherida:

- Cristales en forma de agujas cortas (CSH)
- Granos de diferentes tamaños

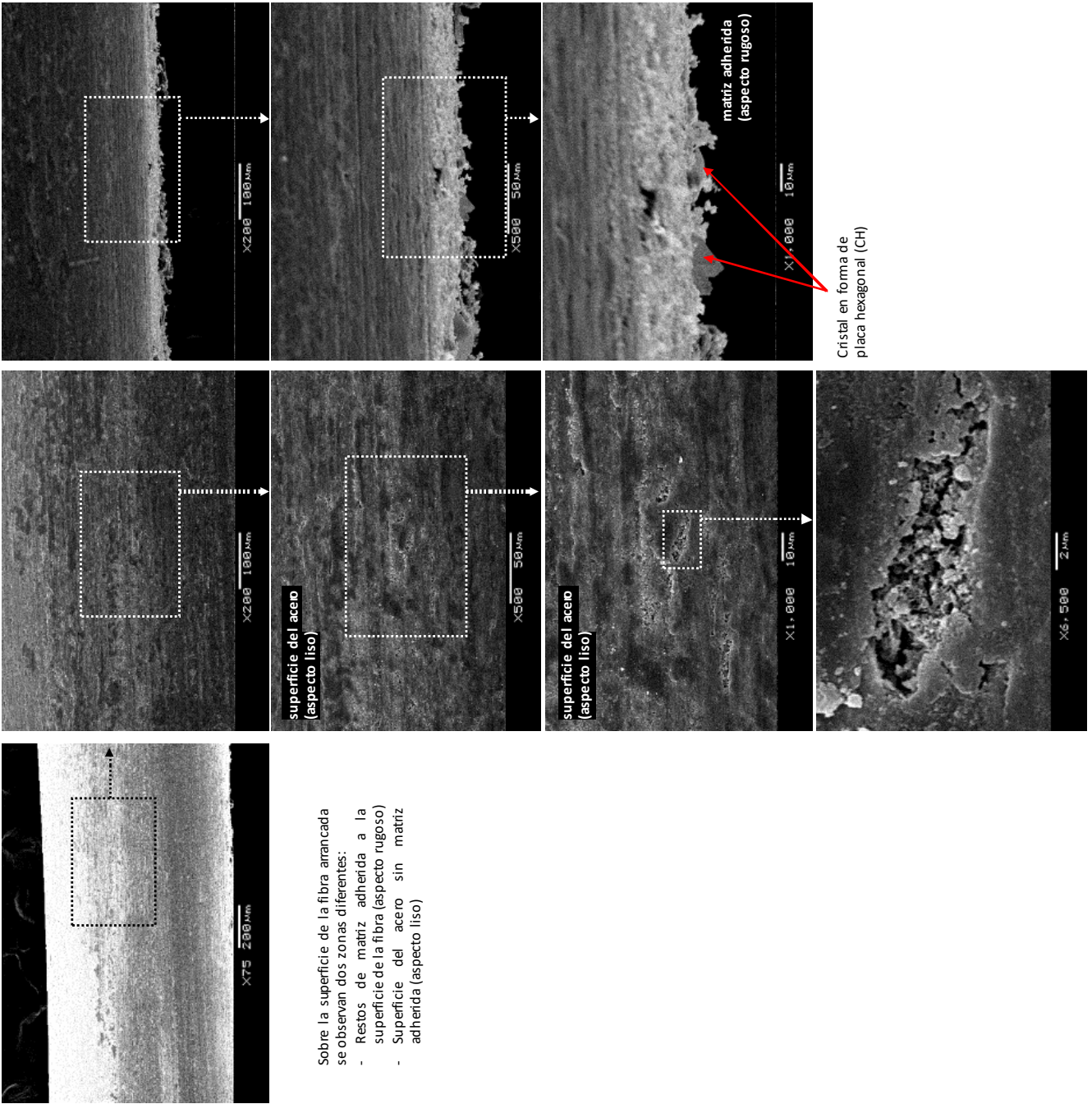
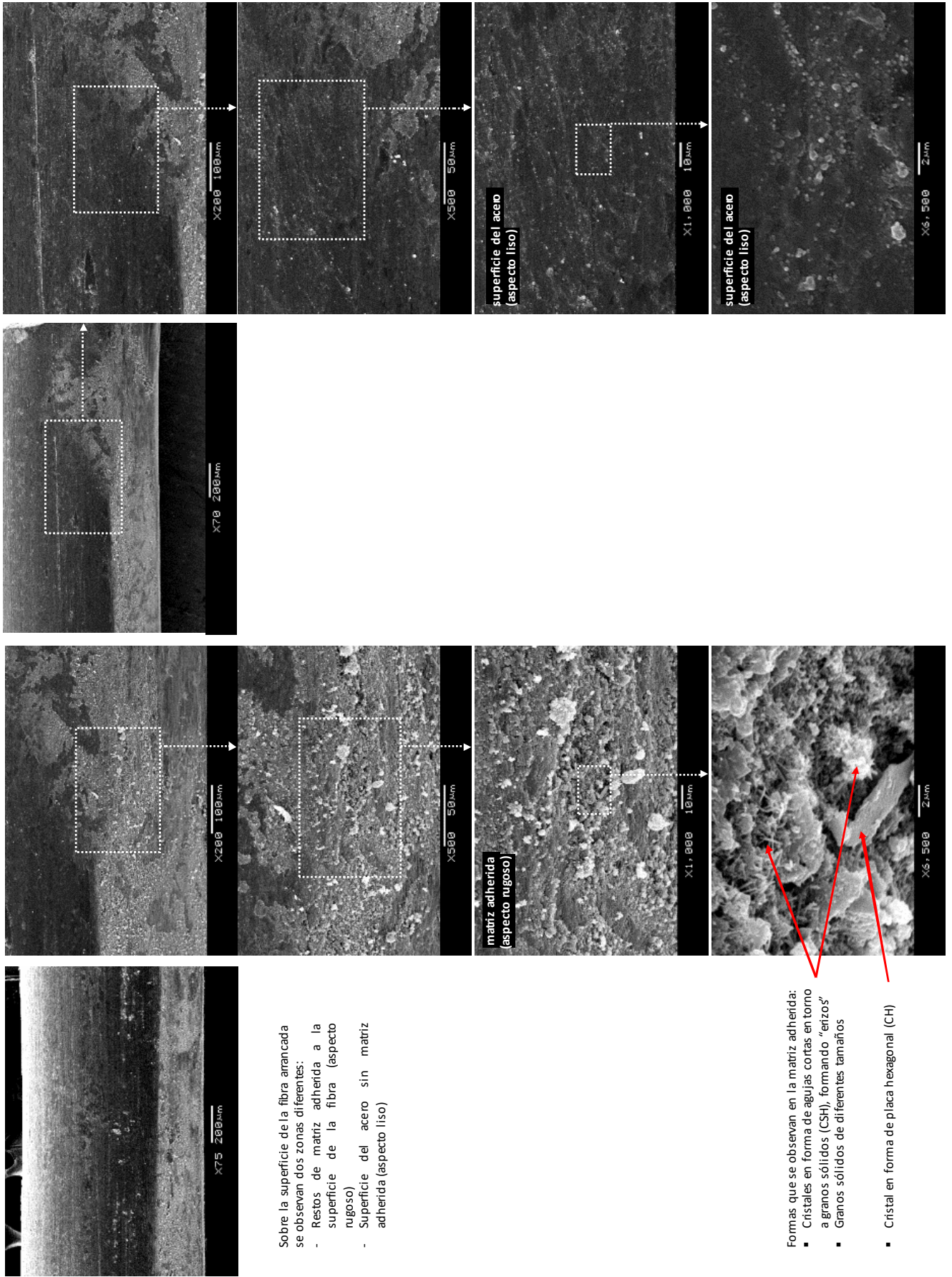


Figura A-12. Imágenes MEB de la fibra MH1/10/R



Sobre la superficie de la fibra amancada se observan dos zonas diferentes:

- Restos de matriz adherida a la superficie de la fibra (aspecto rugoso)
- Superficie del acero sin matriz adherida (aspecto liso)

Formas que se observan en la matriz adherida:

- Cristales en forma de agujas cortas en torno a granos sólidos (CSH), formando "erizos"
- Granos sólidos de diferentes tamaños
- Cristal en forma de placa hexagonal (CH)

Figura A-13. Imágenes MEB de la fibra MH1/10/R

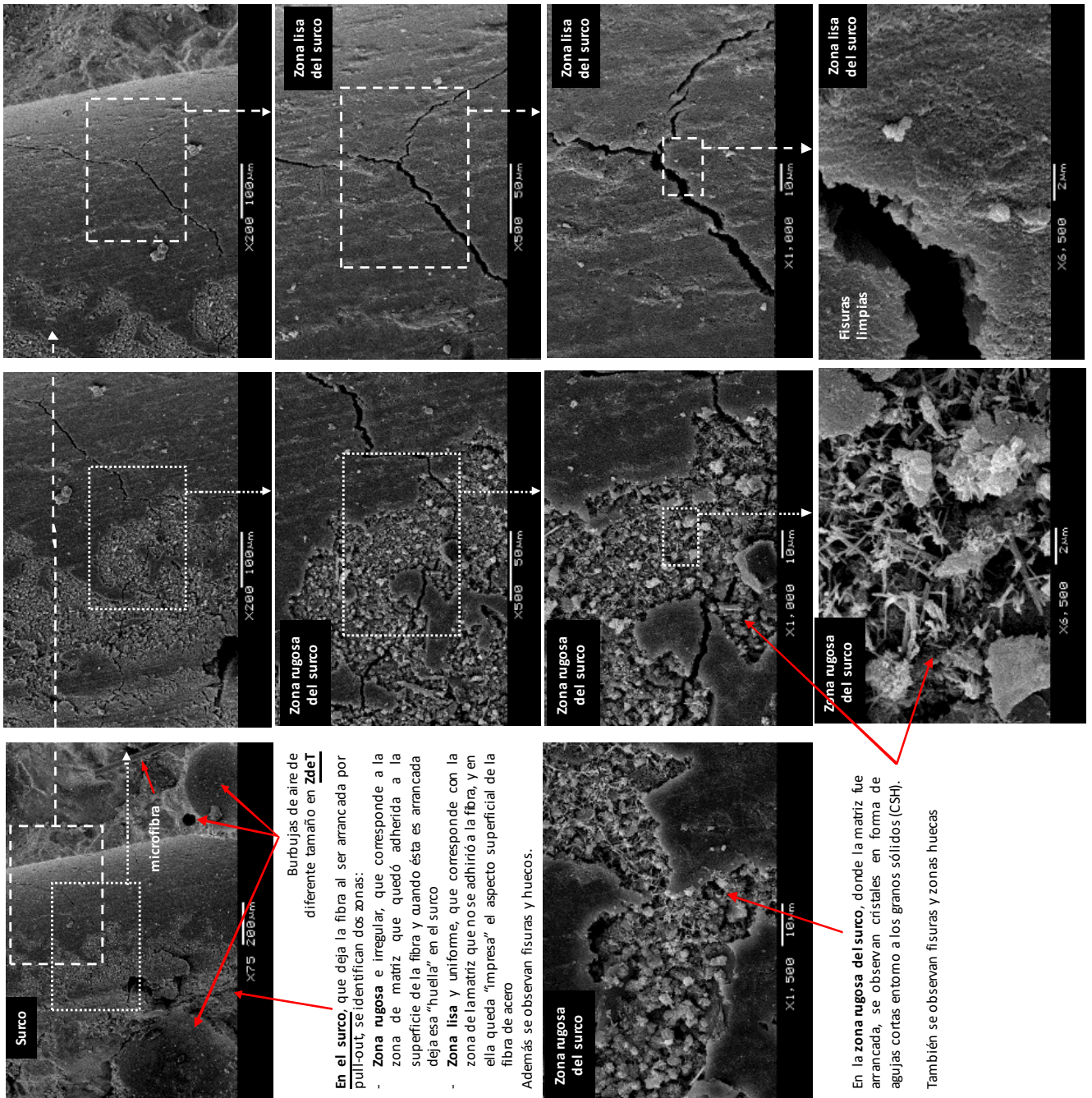
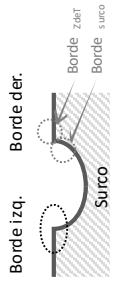
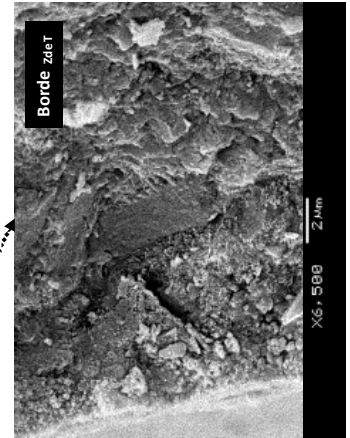
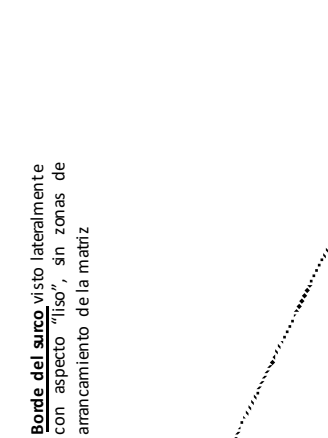
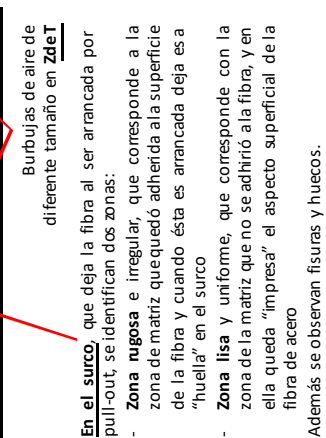
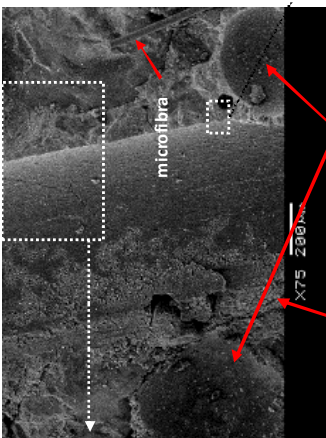
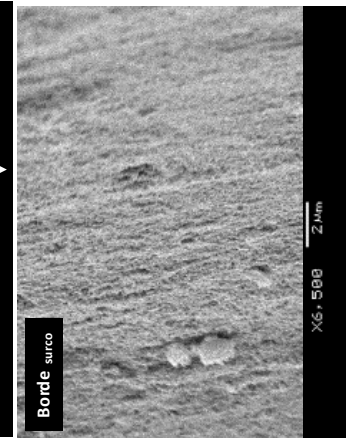
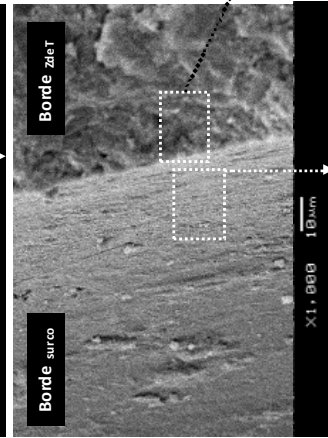
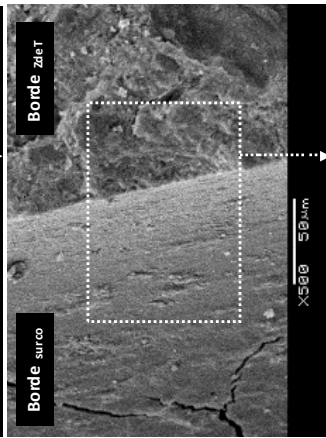
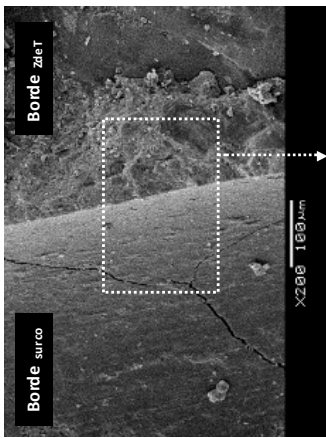


Figura A-14. Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R



Burbujas de aire de diferente tamaño en **ZdeT**

- En el surco**, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:
- **Zona rugosa** e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
 - **Zona lisa** y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras y huecos.

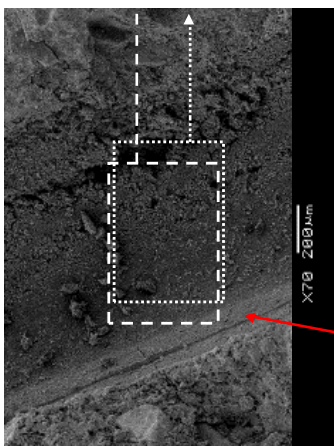
Borde del surco visto lateralmente con aspecto "liso", sin zonas de amarramiento de la matriz

En la **ZdeT** entre **F-M** se observan cristales en forma de agujas cortas entomo a los granos sólidos (CSH)

También se observan fisuras, zonas huecas y burbujas de aire

Cristales en forma de placas hexagonales (CH)

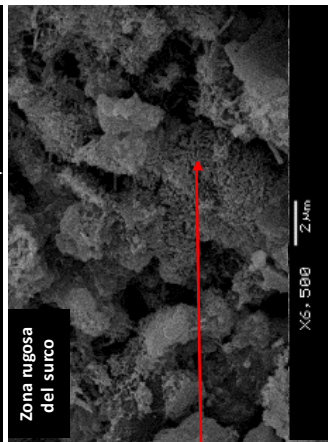
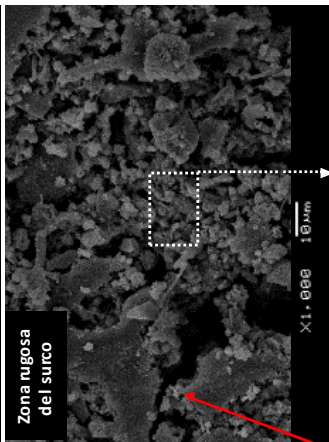
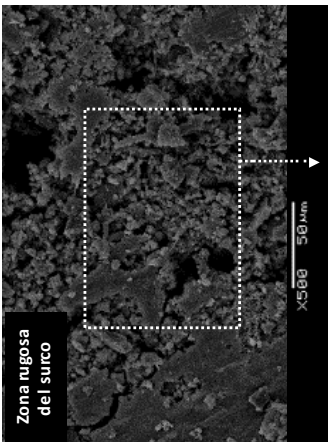
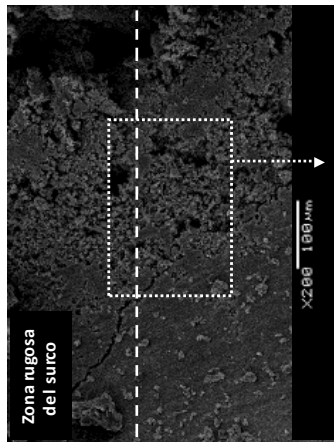
Figura A-15. Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R



En el **surco**, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

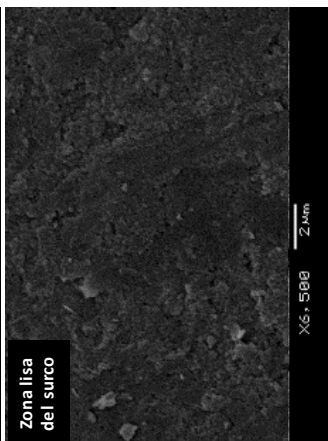
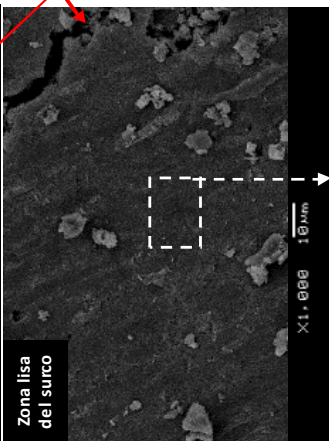
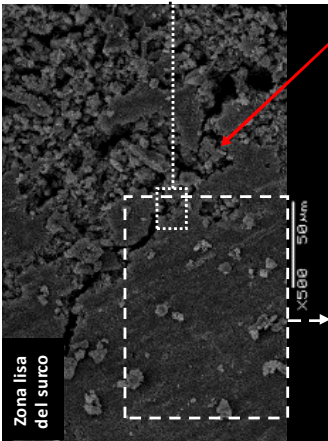
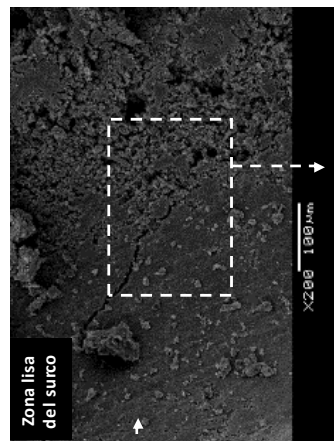
- **Zona rugosa** e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- **Zona lisa** y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras y huecos.



En la **zona rugosa del surco**, donde la matriz fue arrancada, se observan cristales en forma de agujas cortas entorno a los granos sólidos (CSH).

También se observan fisuras y zonas huecas



Zona lisa del surco:
En la fisura se observan formas de agujas cortas entorno a los granos sólidos (CSH)

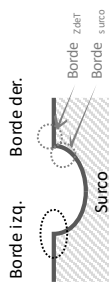
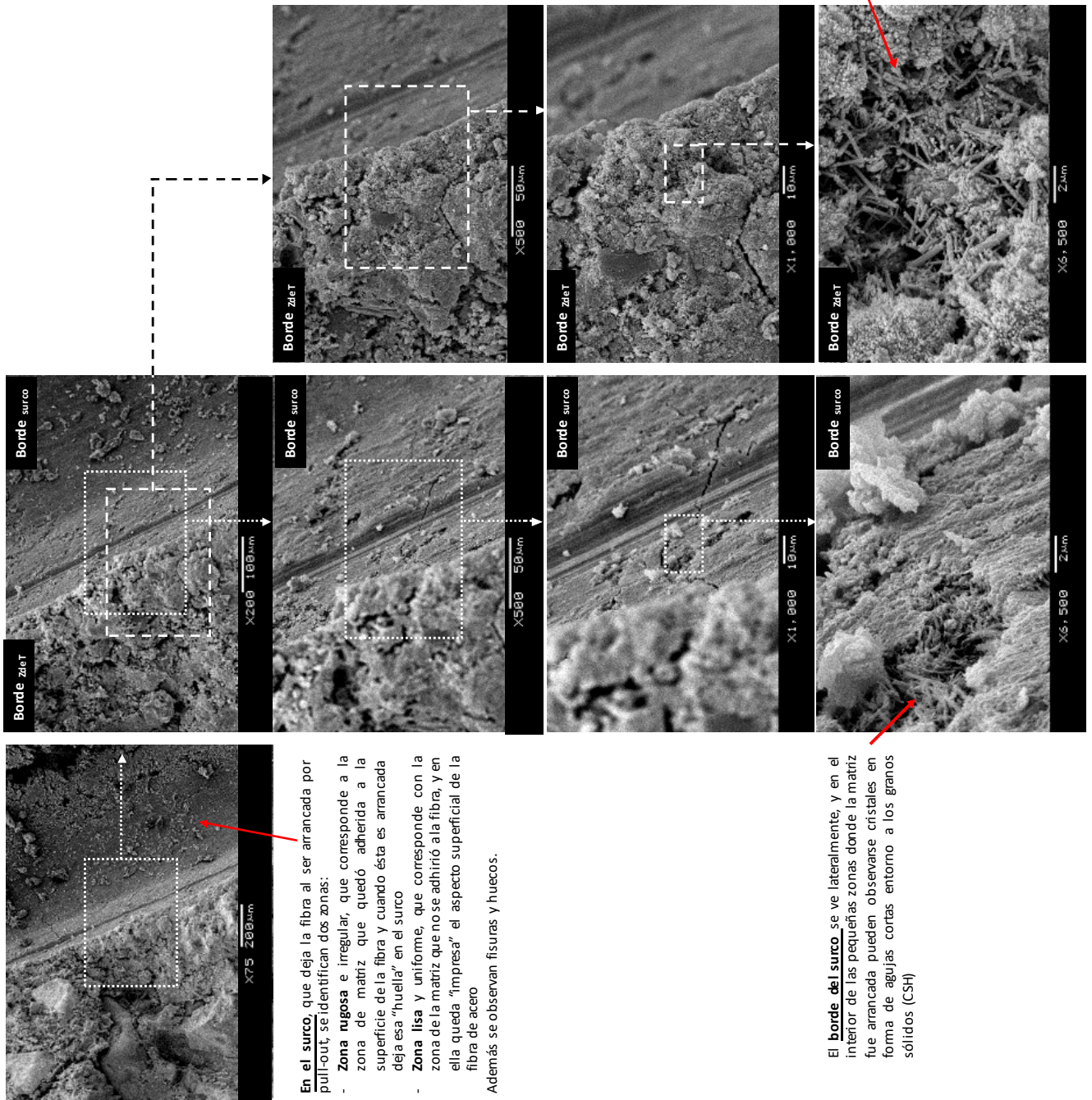
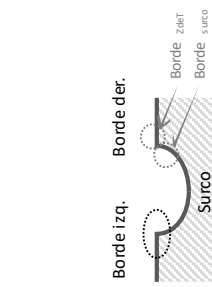


Figura A-16. Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R



En el **surco**, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa** e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- **Zona lisa** y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras y huecos.

El **borde del surco** se ve lateralmente, y en el interior de las pequeñas zonas donde la matriz fue arrancada pueden observarse cristales en forma de agujas cortas entorno a los granos sólidos (CSH)

En la **ZdeT** entre **F-M** se observan cristales en forma de agujas cortas entorno a los granos sólidos (CSH), formando como "entozos"

También se observan fisuras y zonas huecas

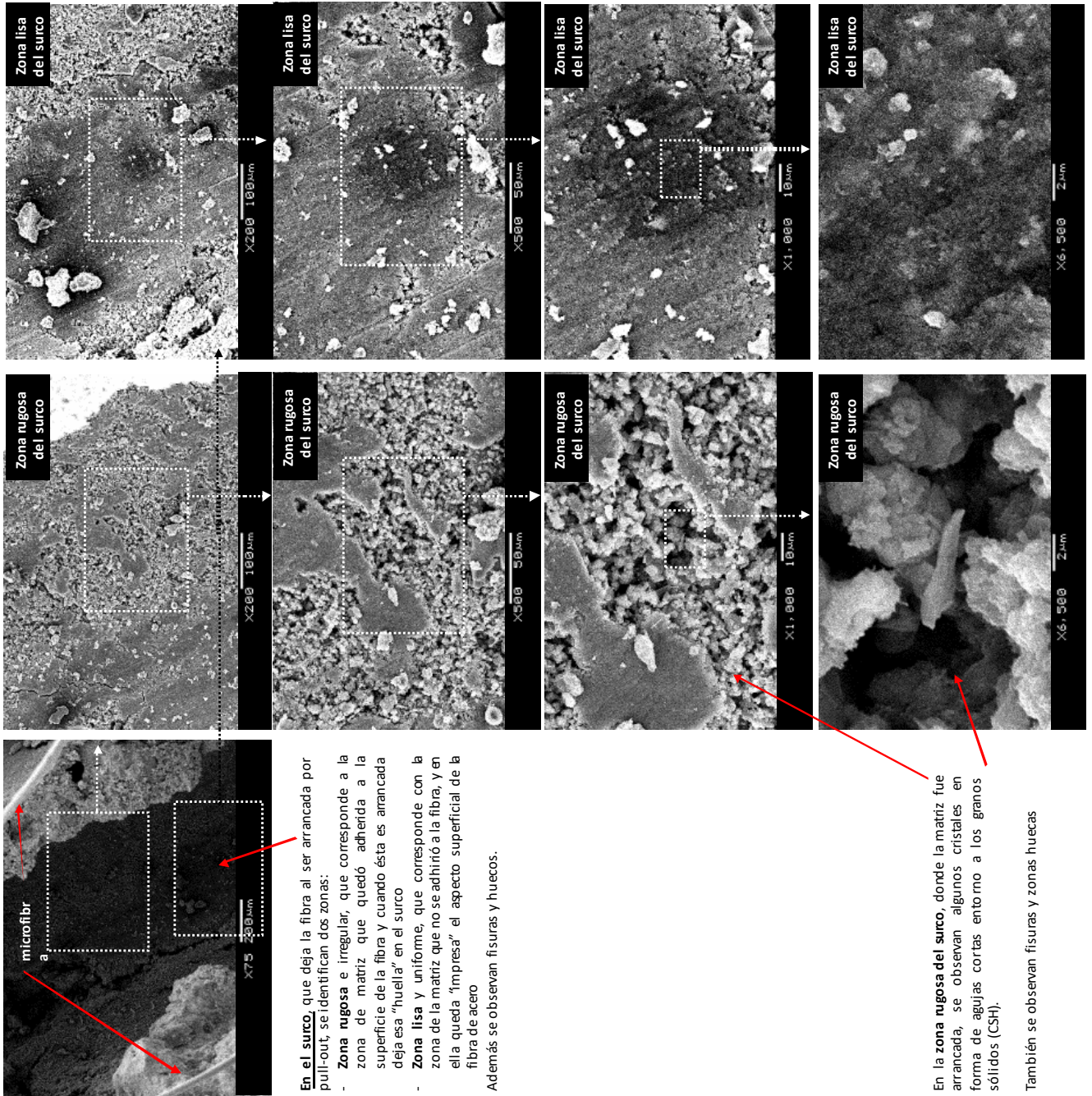
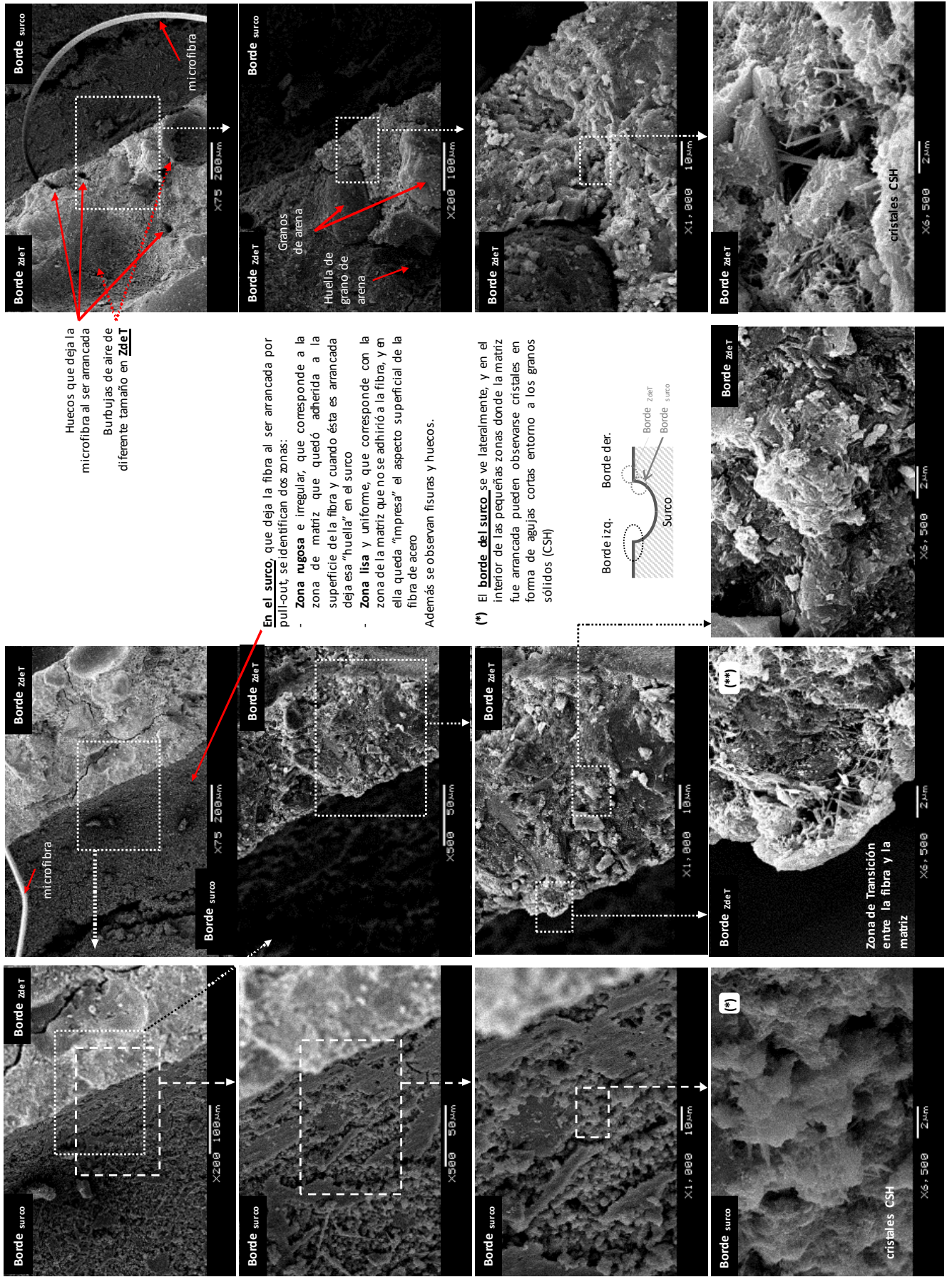


Figura A-18. Imágenes MEB de la matriz MH1/10/R



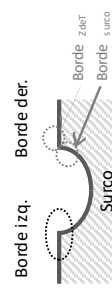
Huecos que deja la microfibra al ser arrancada
 Burbujas de aire de diferente tamaño en Zdt

En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- Zona rugosa e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- Zona lisa y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras y huecos.

(*) El borde del surco se ve lateralmente, y en el interior de las pequeñas zonas donde la matriz fue arrancada pueden observarse cristales en forma de agujas cortas entorno a los granos sólidos (CSH)



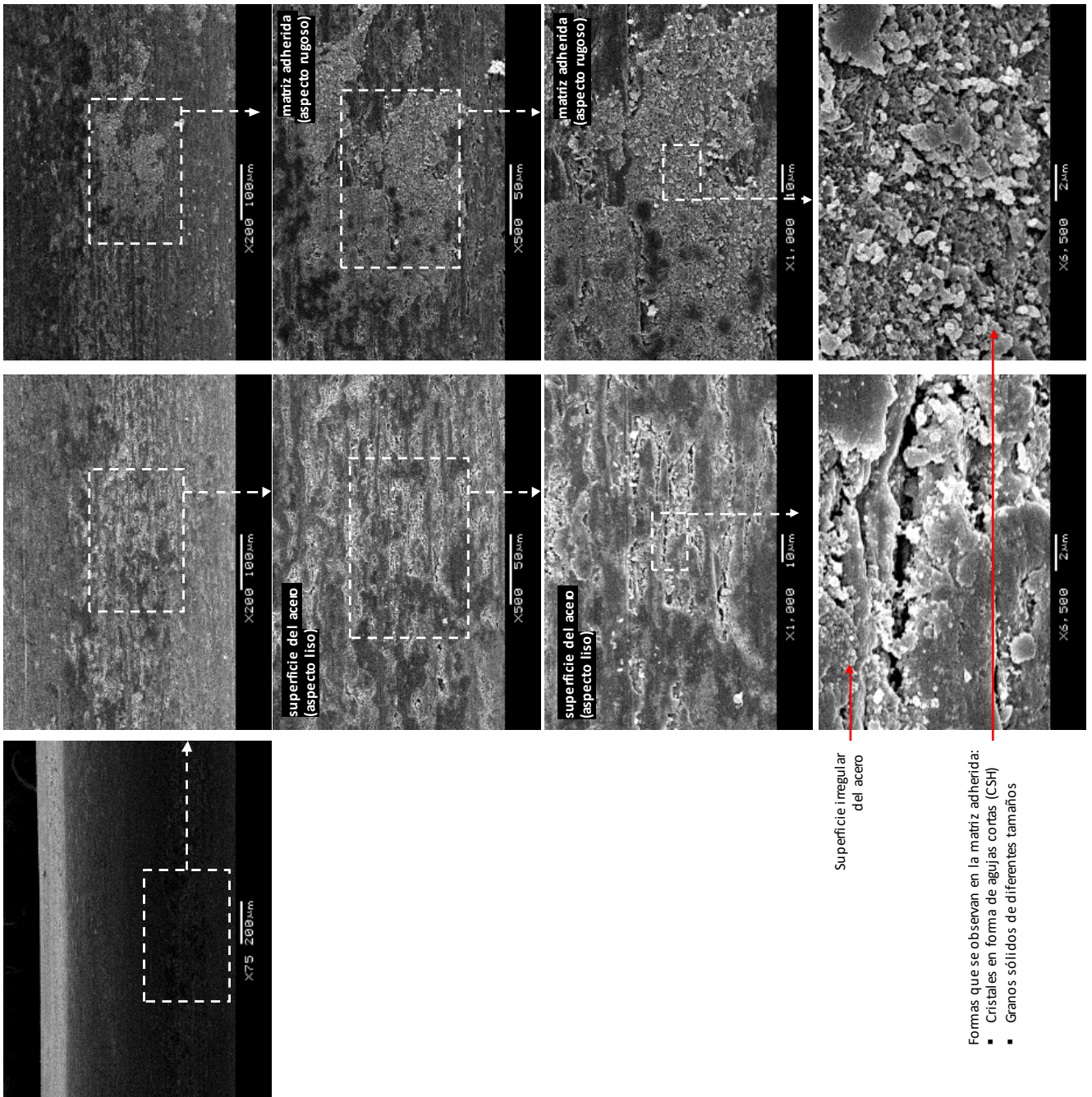
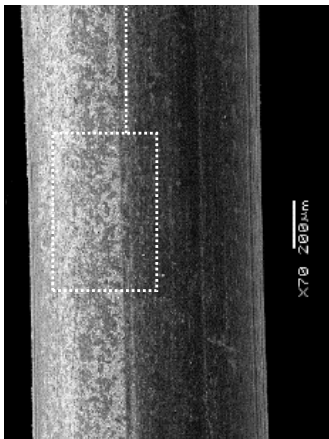
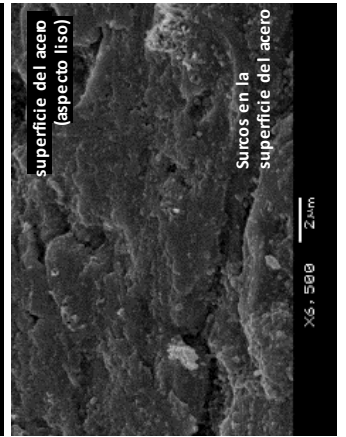
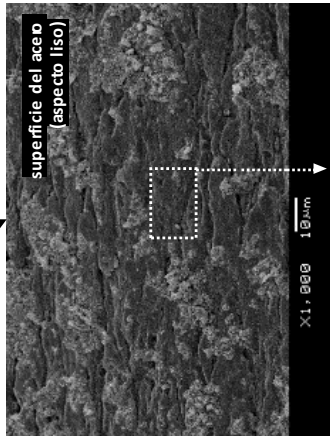
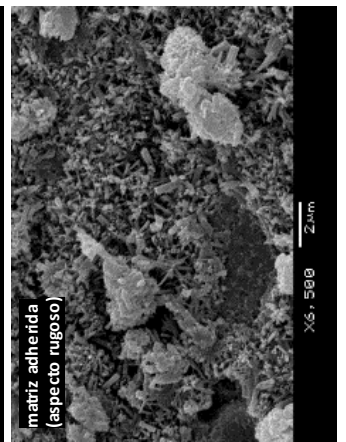
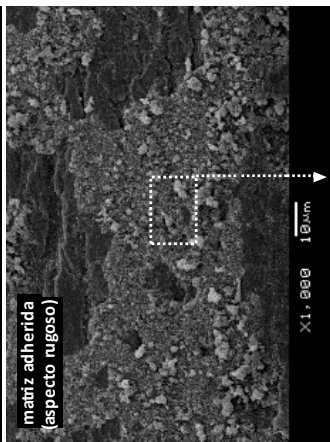
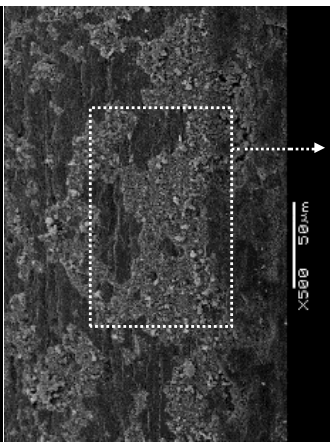
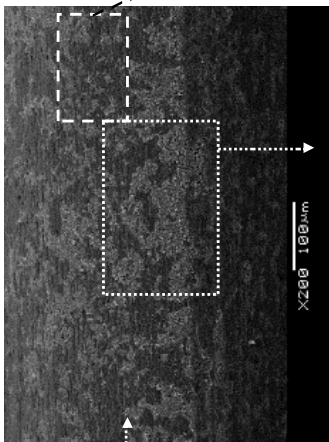


Figura A-20. Imágenes MEB de la fibra MH1/15/R



Sobre la superficie de la fibra arrancada se observan dos zonas diferentes:

- Restos de matriz adherida a la superficie de la fibra (aspecto rugoso)
- Superficie del acero sin matriz adherida (aspecto liso)



- Formas que se observan en la matriz adherida:
- Cristales en forma de agujas cortas entomo a granos sólidos (CSH), en algunos casos formando "erizos"
 - Granos sólidos de diferentes tamaños

Figura A-21. Imágenes MEB de la fibra MH1/15/R

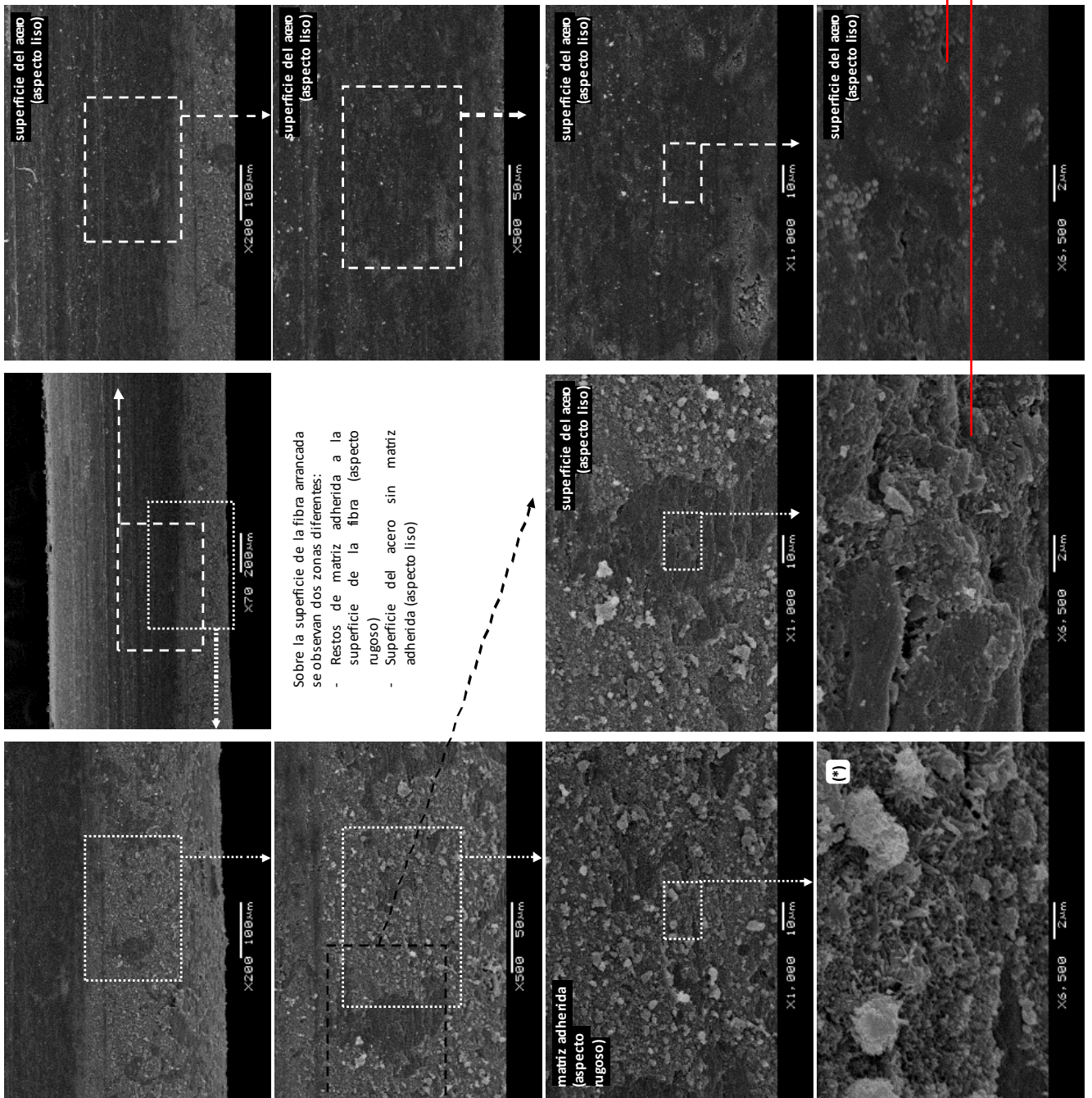
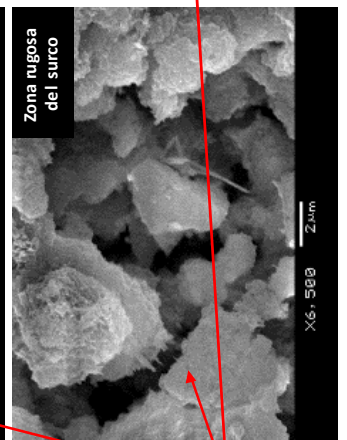
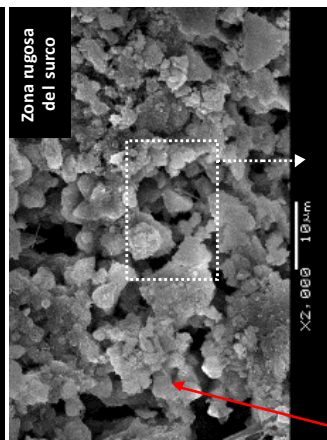
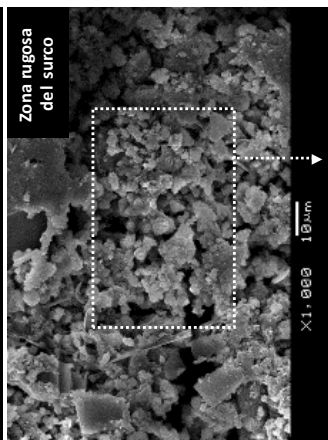
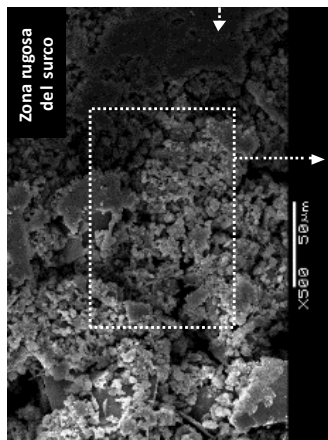
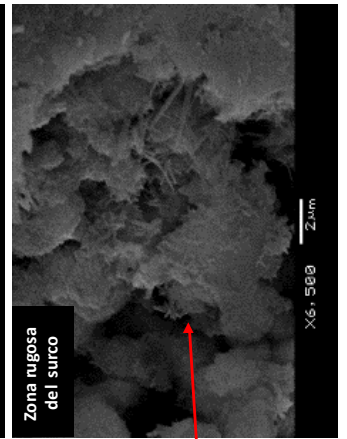
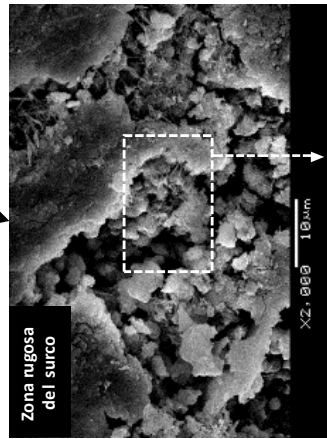
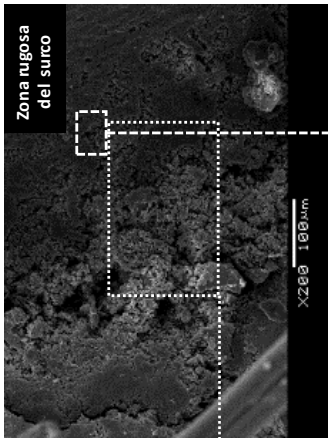
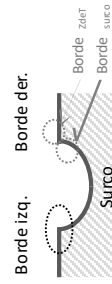
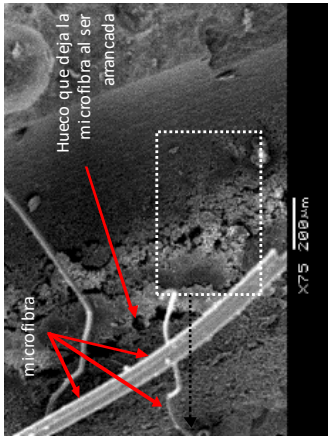
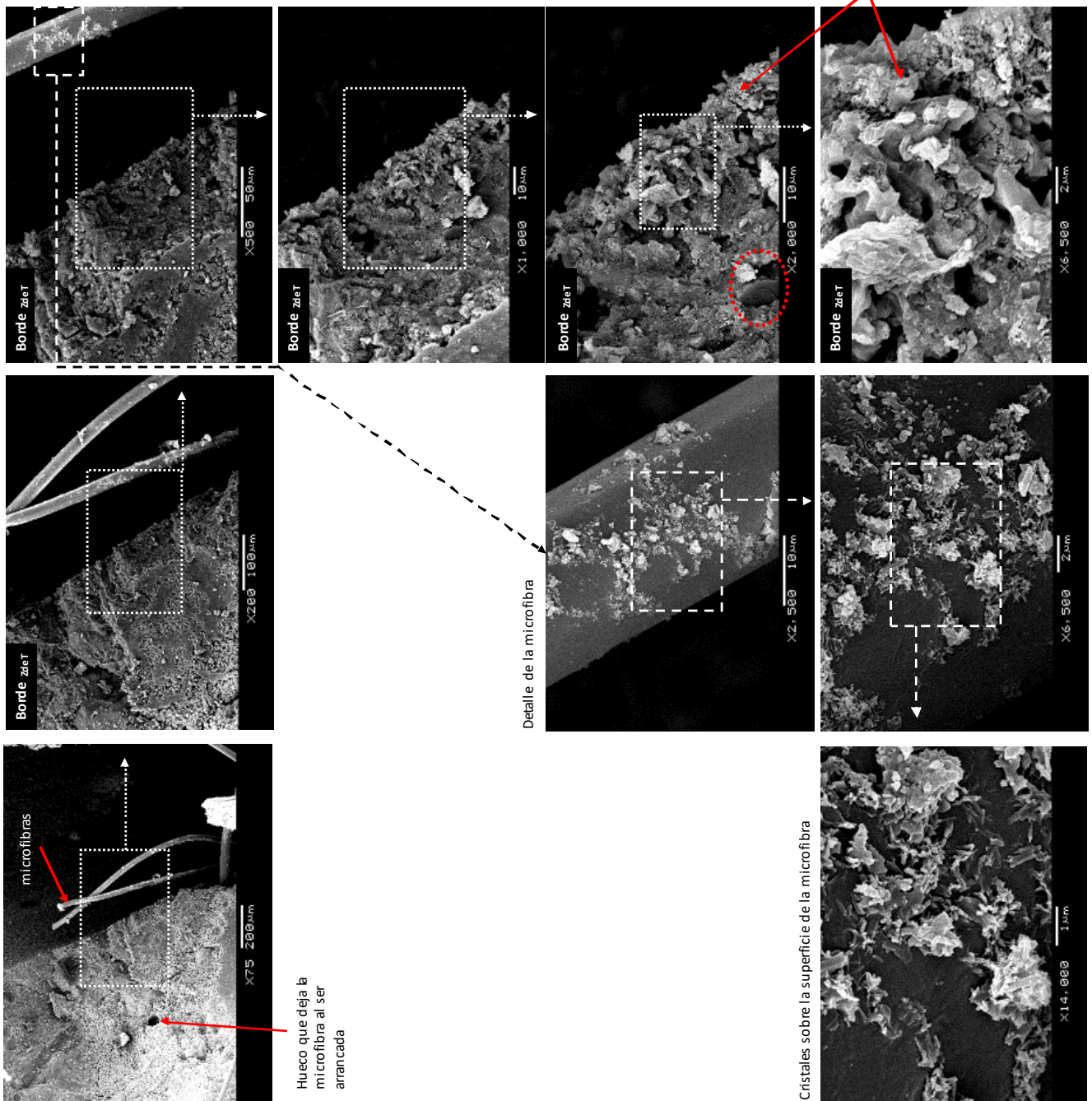


Figura A-22. Imágenes MEB de la fibra MH1/15/R



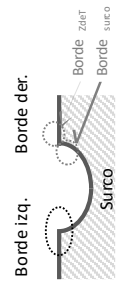
En la **zona rugosa del surco**, donde la matriz fue arrancada, se observan algunos cristales en forma de agujas cortas saliendo de los granos sólidos (CSH)

También se observan fisuras y zonas huecas



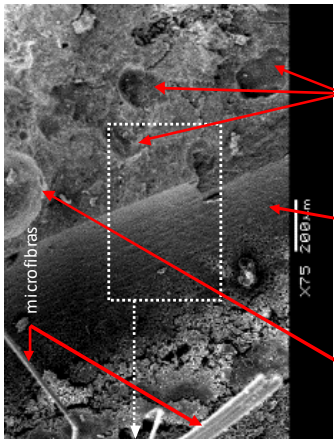
Hueco que deja la microfibra al ser arrancada

Cristales sobre la superficie de la microfibra



En la ZdeT entre F-M se observan cristales en forma de agujas cortas entorno a los granos sólidos (CSH), y algunos cristales hexagonales (CH). También se observan fisuras y zonas huecas

Figura A-24. Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R



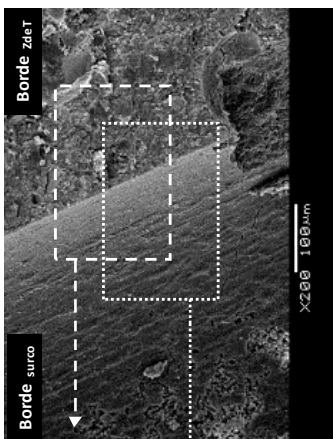
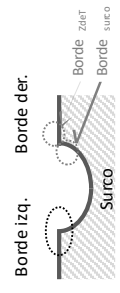
Burbujas de aire en la ZdeT

Huellas que dejan los granos de arena

En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- Zona rugosa e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- Zona lisa y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras y huecos.



Cristales en forma de placas hexagonales (CH)

En la ZdeT entre F-M se observan cristales en forma de agujas cortas entomo a los granos sólidos (CSH)

También se observan fisuras y zonas huecas

El borde del surco se ve lateralmente, y en el interior de las pequeñas zonas donde la matriz fue arrancada pueden observarse cristales en forma de agujas cortas entomo a los granos sólidos (CSH)

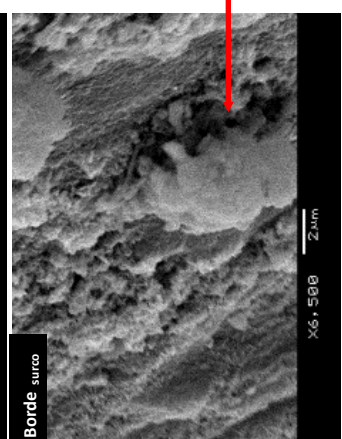
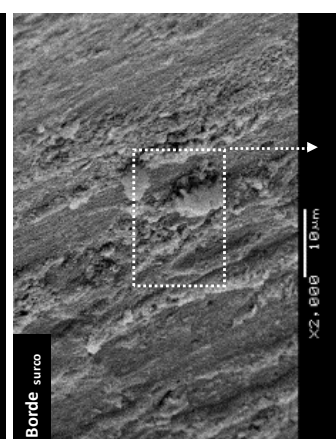
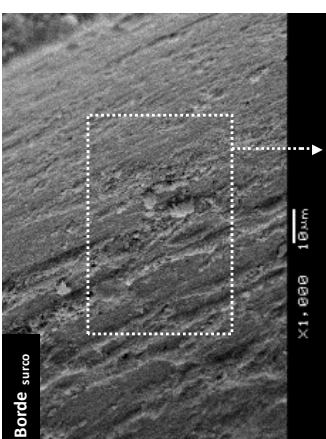
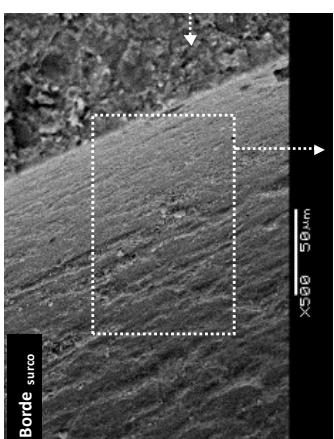
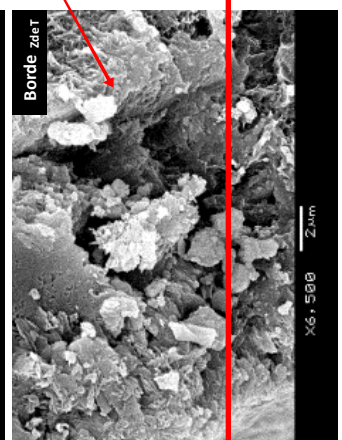
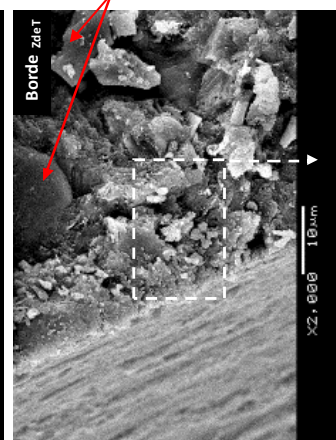
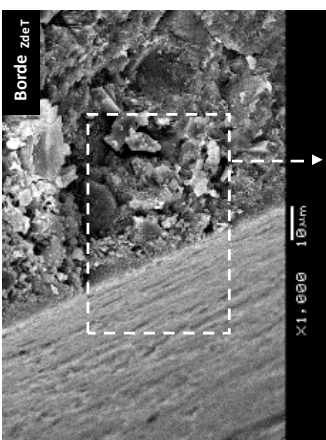
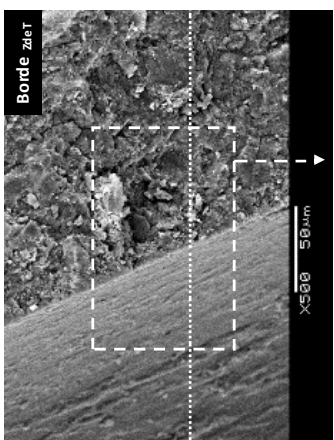
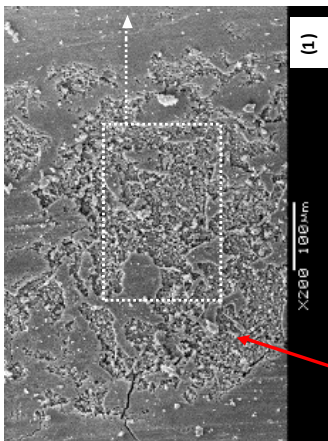
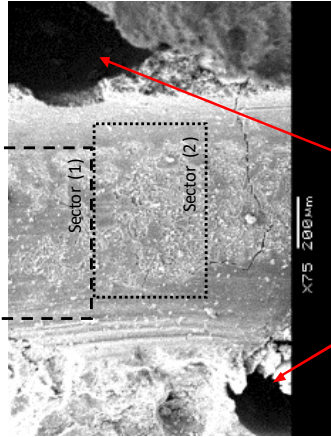
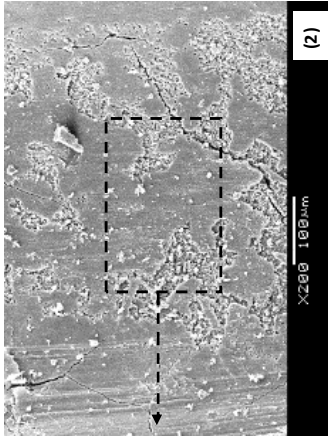
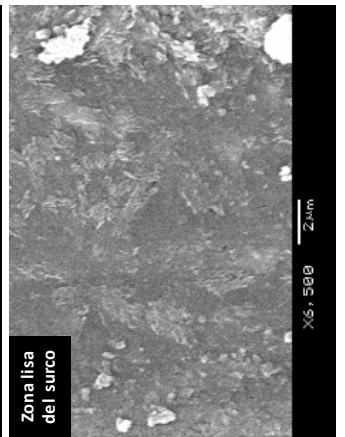
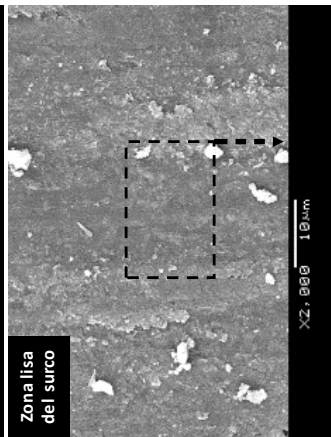
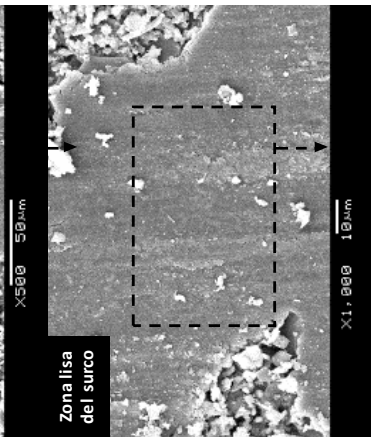
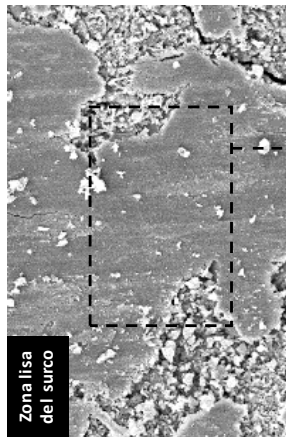
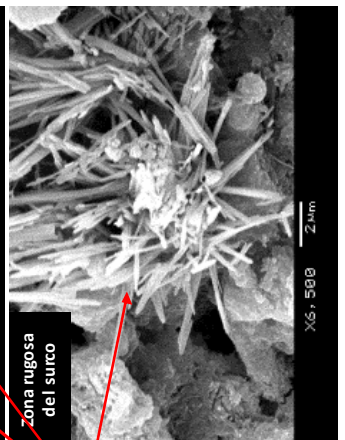
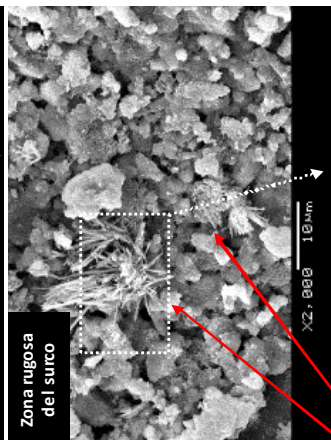
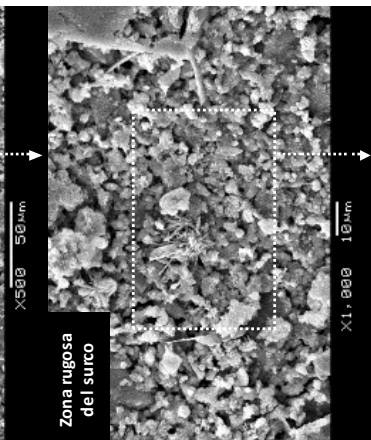
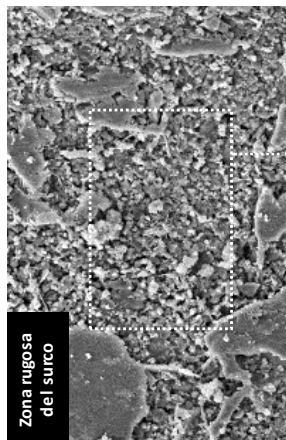


Figura A-25. Imágenes MEB de la matriz MH1/15/R

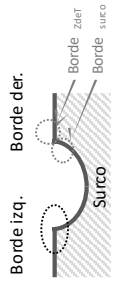


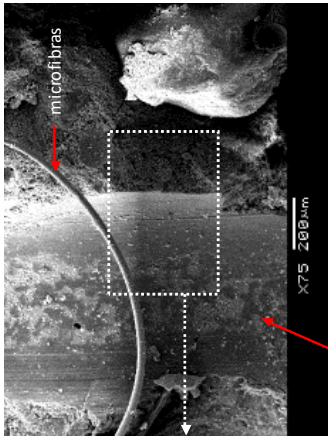
En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- Zona rugosa e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
 - Zona lisa y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero
- Además se observan fisuras y huecos.



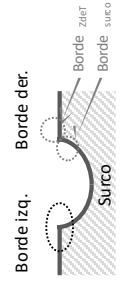
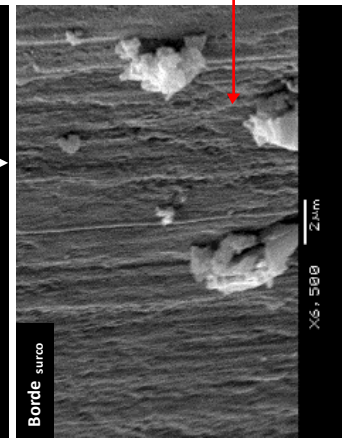
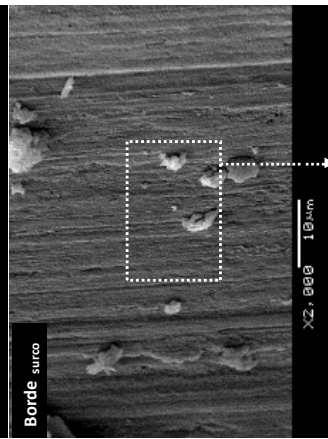
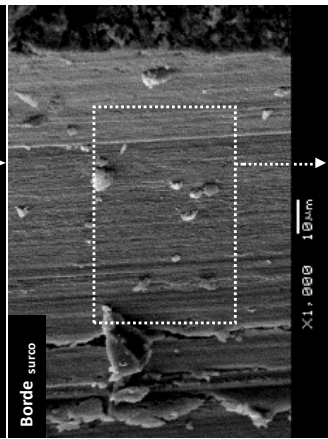
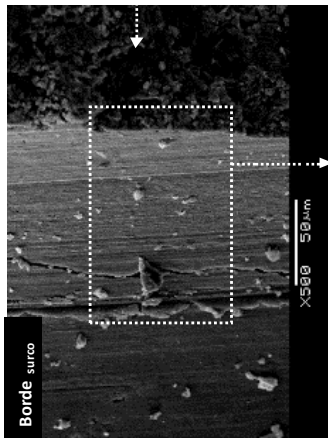
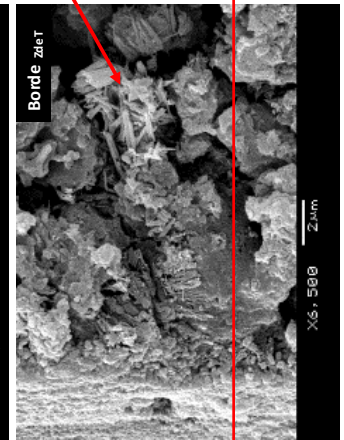
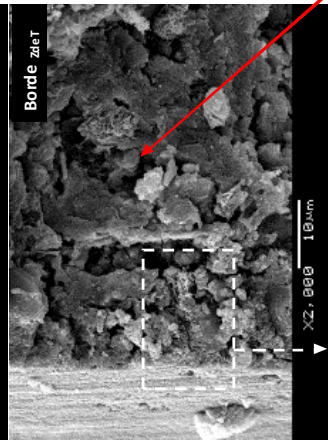
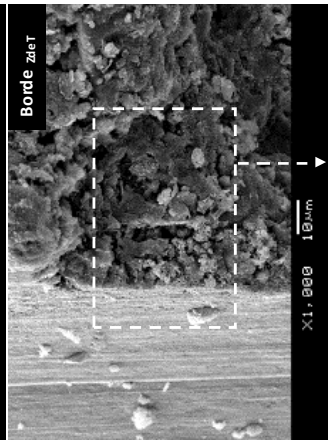
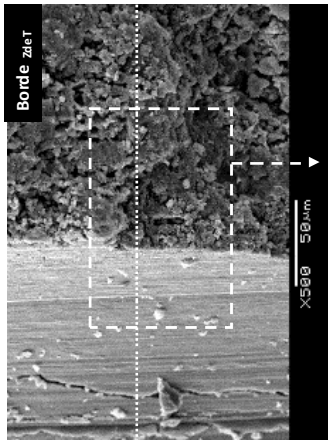
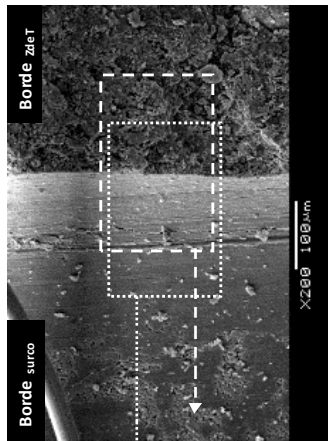
Burbujas de aire en la ZDET





En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- Zona rugosa e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
 - Zona lisa y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero
- Además se observan fisuras y huecos.



En la ZrTeT entre FM se observan cristales en forma de agujas cortas entomo a los granos sólidos (CSH)

También se observan fisuras y zonas huecas

El borde del surco se ve lateralmente, y se observa que en este sector la matriz no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

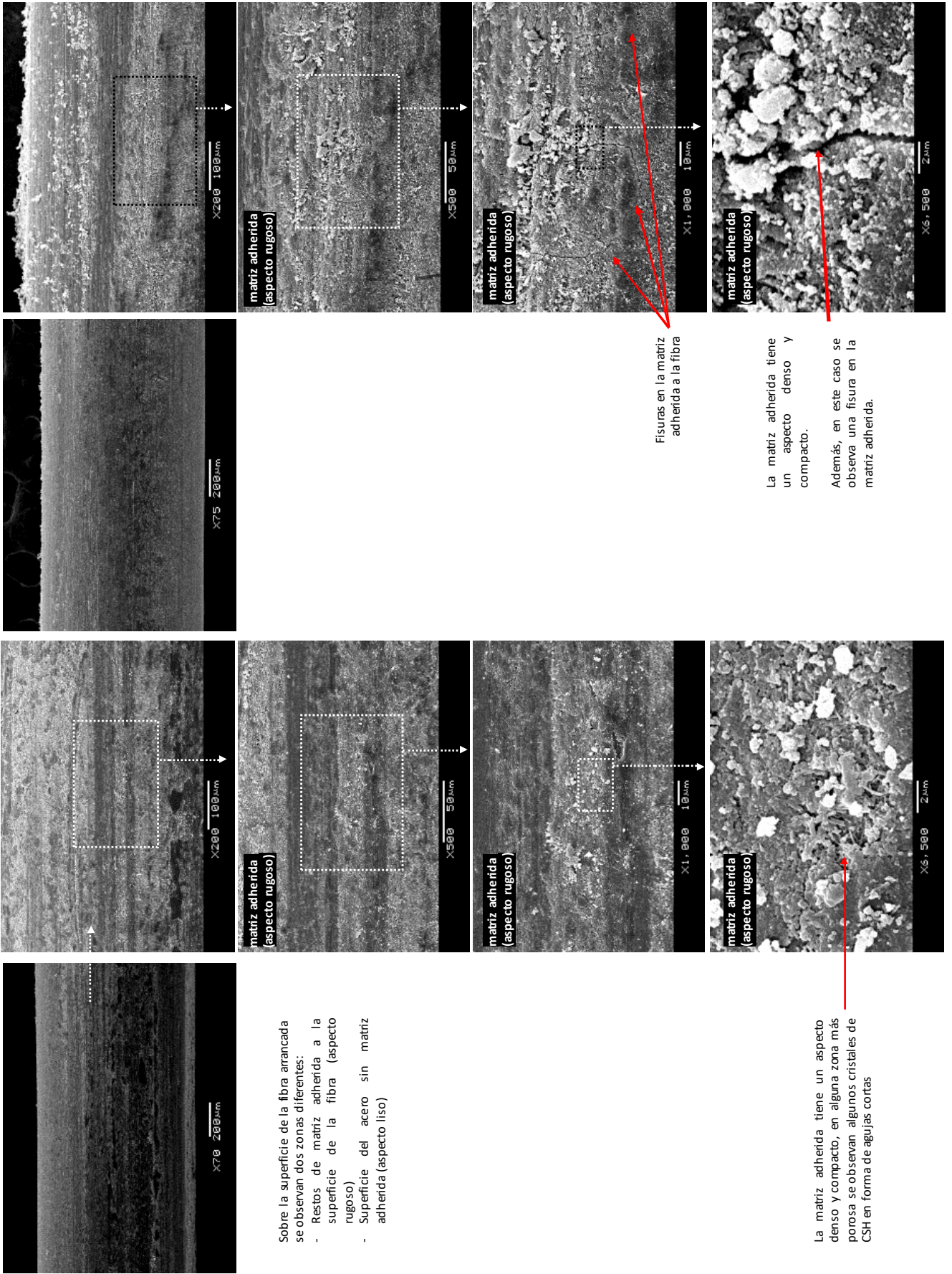
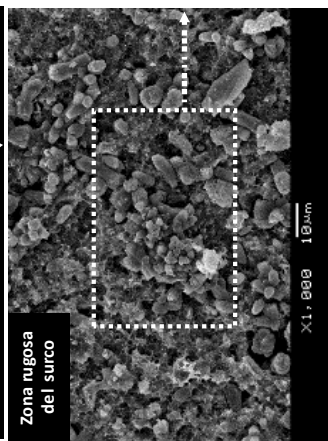
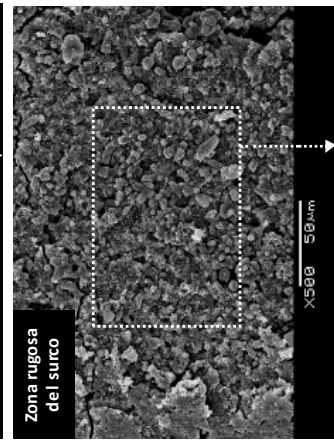
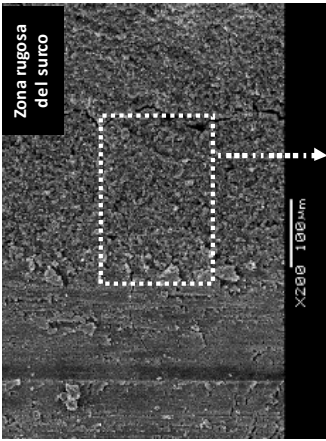
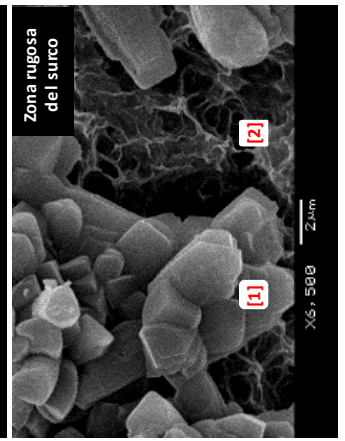
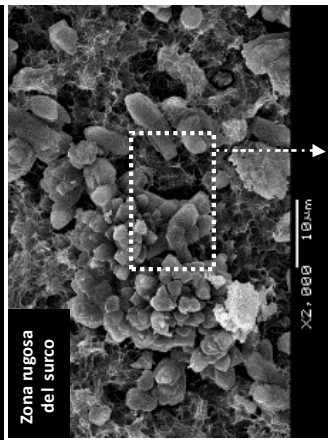
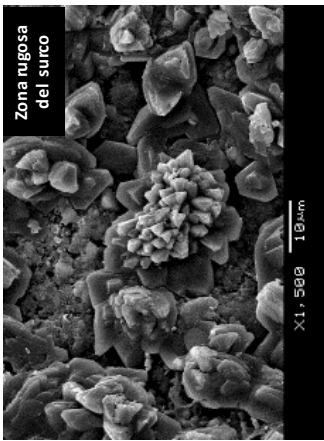
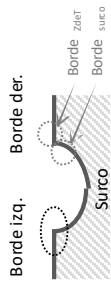
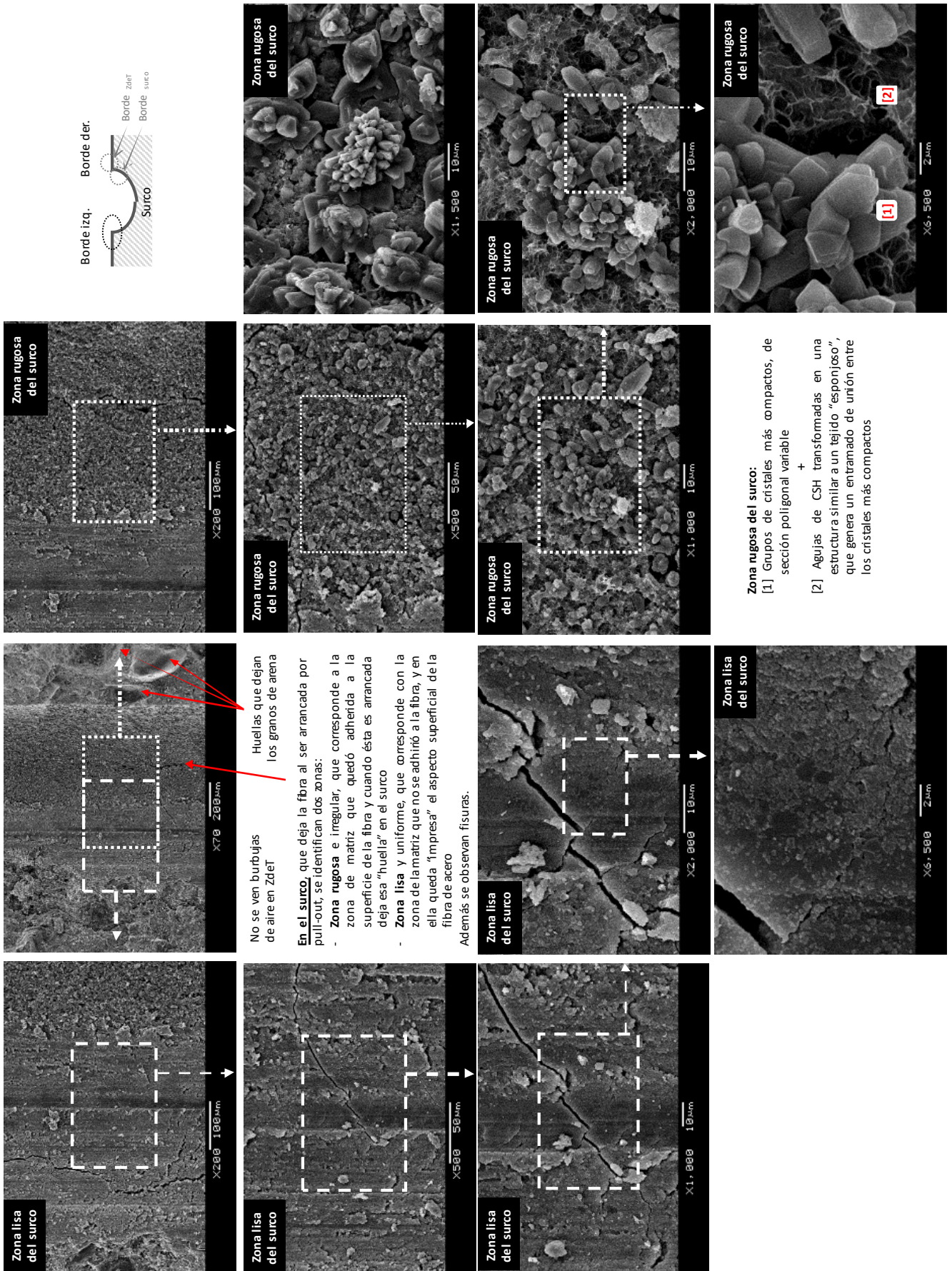
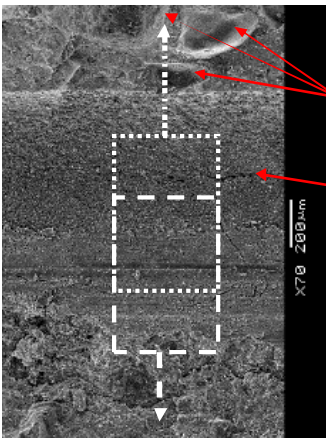


Figura A-28. Imágenes MEB de la fibra MH2/0/R



Zona rugosa del surco:
 [1] Grupos de cristales más compactos, de sección poligonal variable
 +
 [2] Agujas de CSH transformadas en una estructura similar a un tejido "esponjoso", que genera un entramado de unión entre los cristales más compactos



No se ven burbujas de aire en ZdeT

Huellas que dejan los granos de arena

En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa** e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- **Zona lisa** y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras.

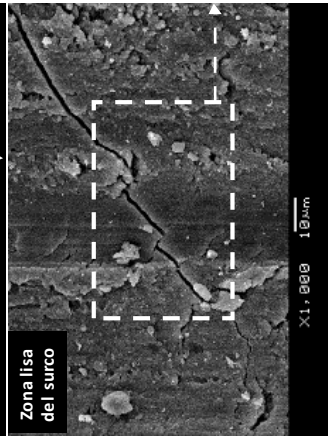
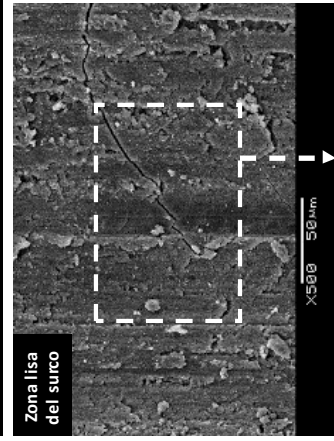
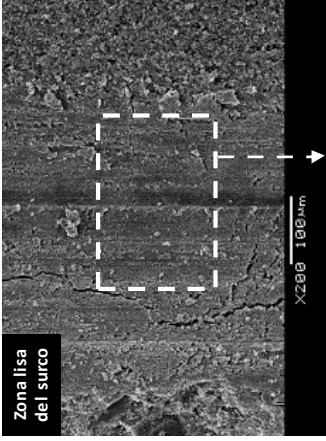
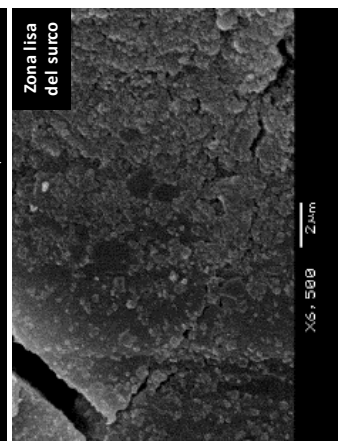
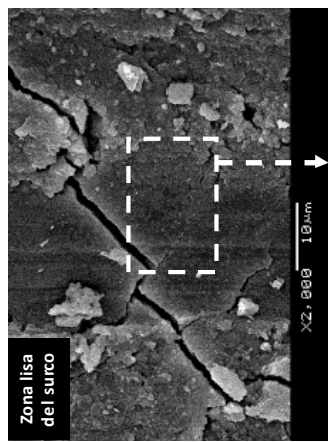
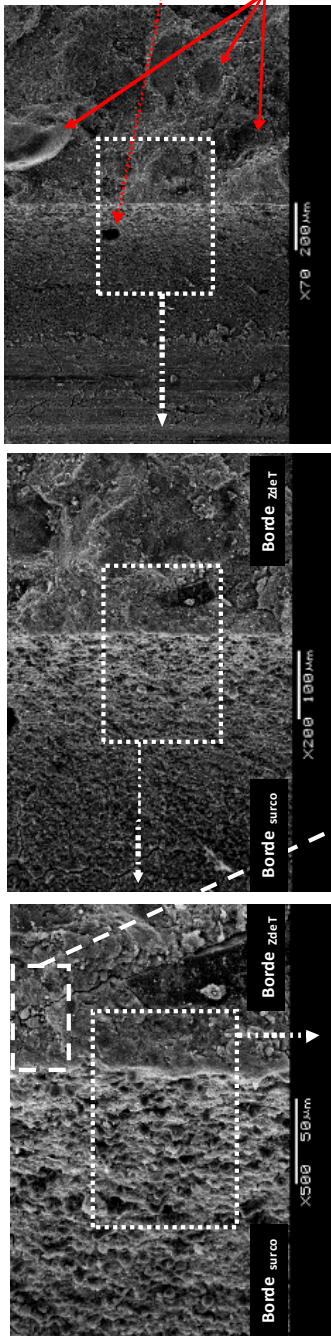


Figura A-29. Imágenes MEB de la matriz MH2/0/R



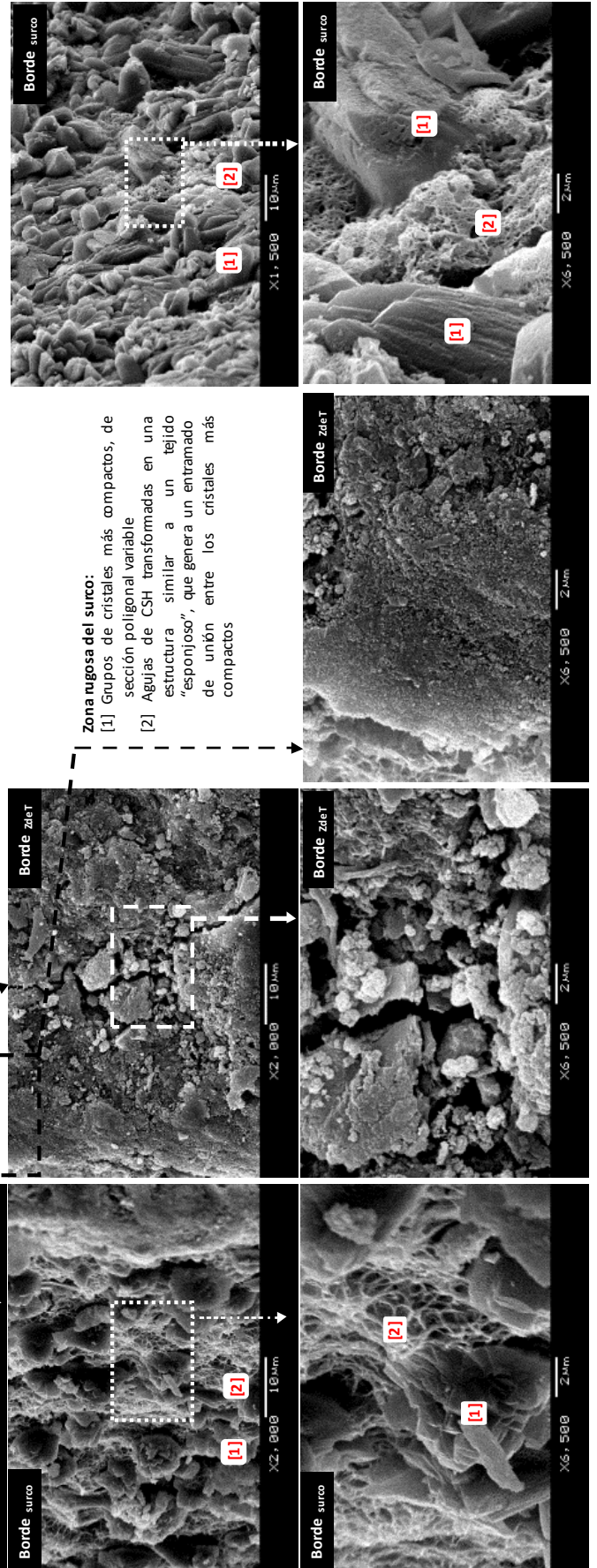
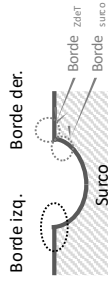
Hueco que deja la microfibrá al ser arrancada

Huellas que dejan los granos de arena

No se ven burbujas de aire en ZdeT

En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- Zona rugosa e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
 - Zona lisa y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero
- Además se observan fisuras.



Zona rugosa del surco:

- [1] Grupos de cristales más compactos, de sección poligonal variable
- [2] Agujas de CSH transformadas en una estructura similar a un tejido "esponjoso", que genera un entramado de unión entre los cristales más compactos

Figura A-30. Imágenes MEB de la matriz MH2/O/R

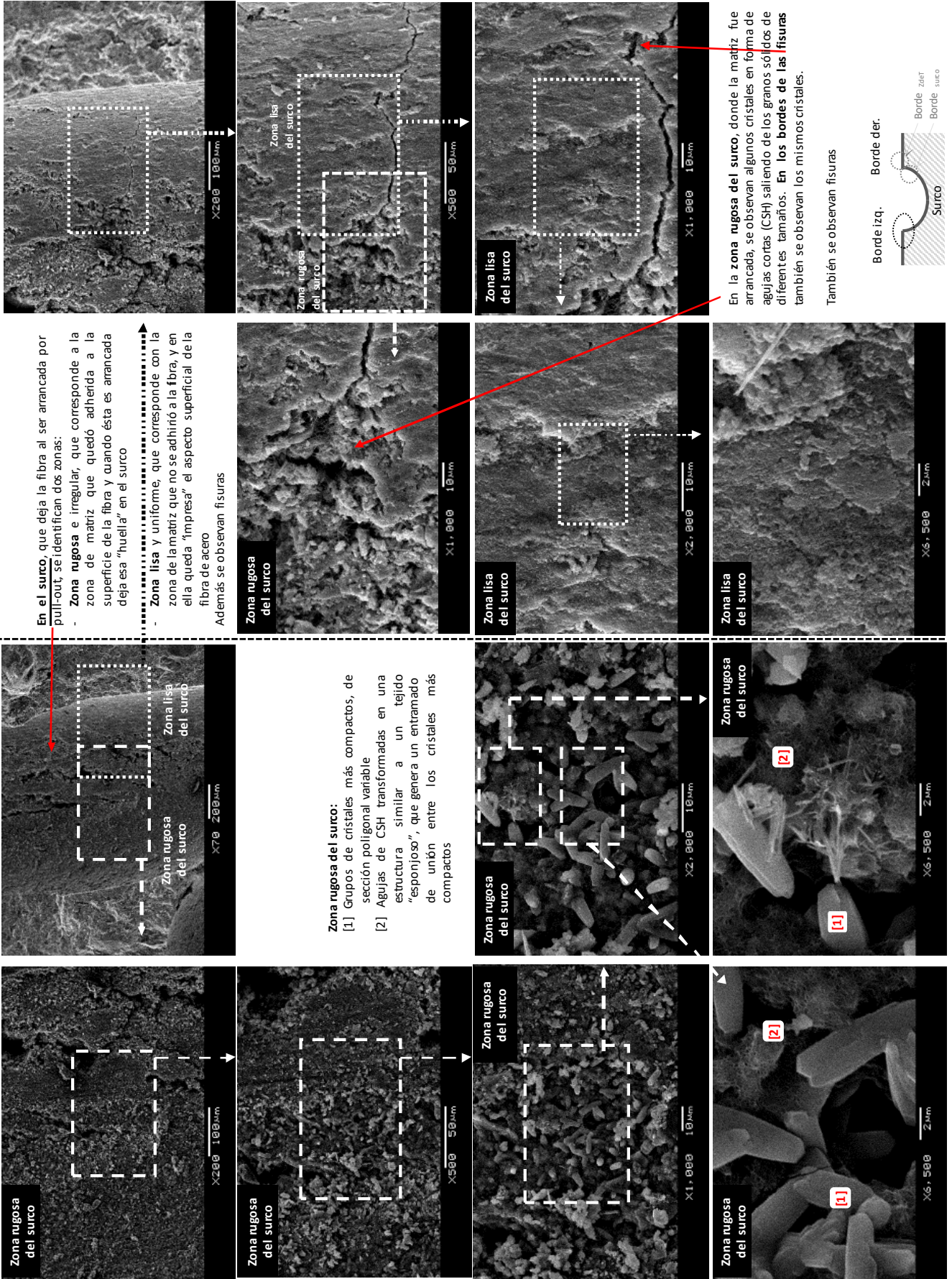
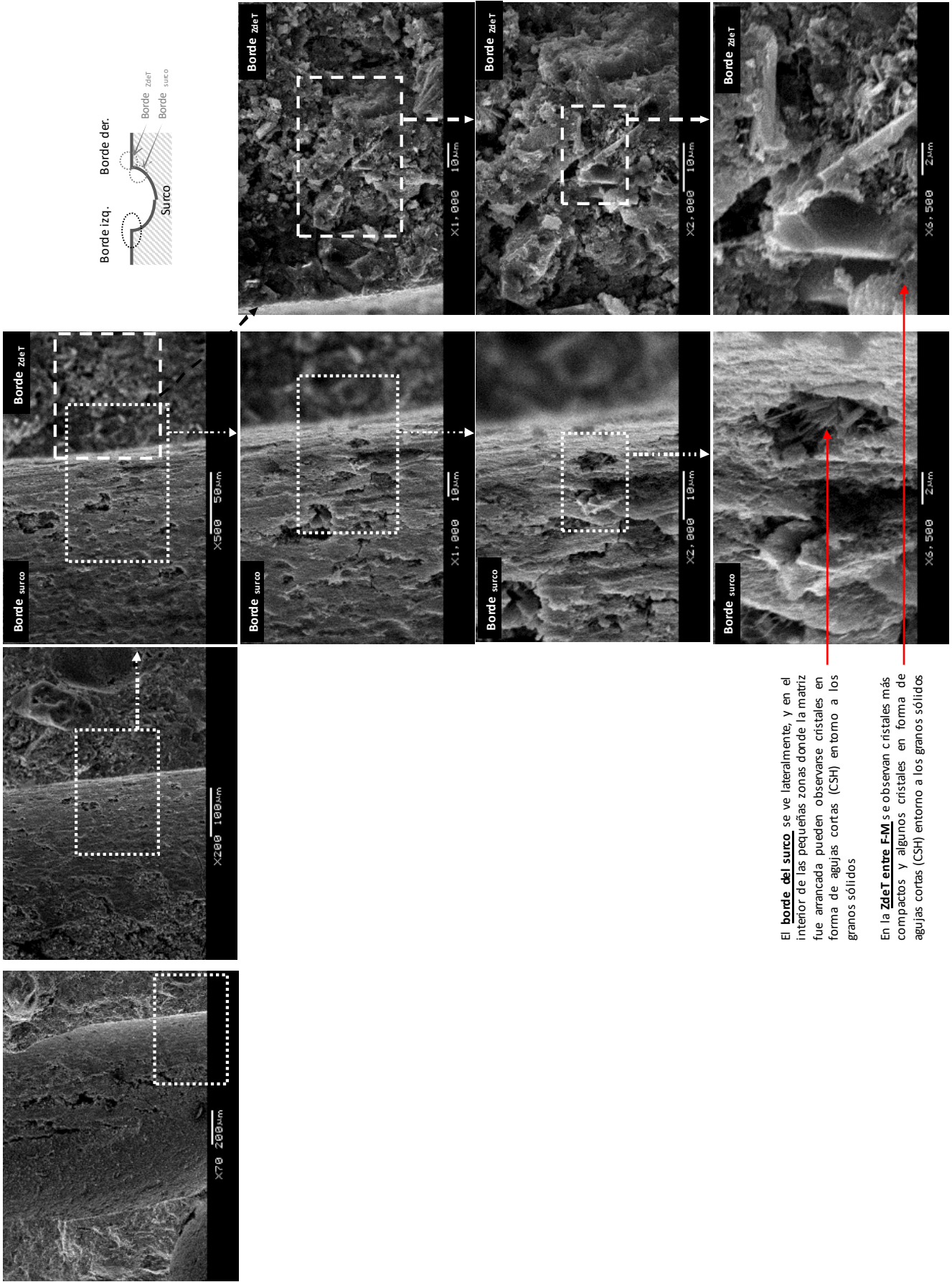
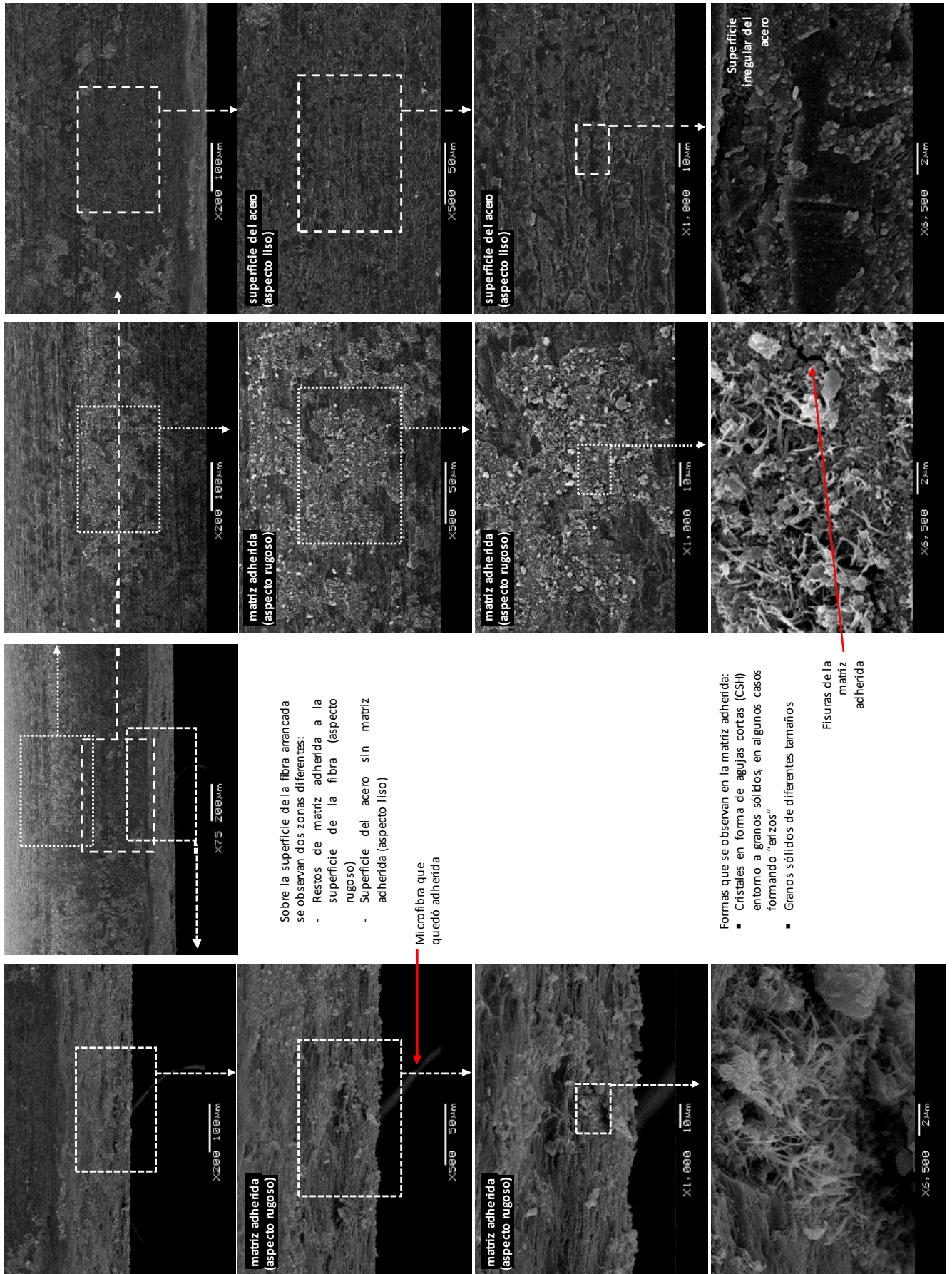


Figura A-31. Imágenes MEB de la matriz MH2/O/R



El **borde del surco** se ve lateralmente, y en el interior de las pequeñas zonas donde la matriz fue arrancada pueden observarse cristales en forma de agujas cortas (CSH) entorno a los granos sólidos

En la **ZdeT entre F-M** se observan cristales más compactos y algunos cristales en forma de agujas cortas (CSH) entorno a los granos sólidos



Sobre la superficie de la fibra arrancada se observan dos zonas diferentes:

- Restos de matriz adherida a la superficie de la fibra (aspecto rugoso)
- Superficie del acero sin matriz adherida (aspecto liso)

Microfibra que quedó adherida

Formas que se observan en la matriz adherida:

- Cristales en forma de agujas cortas (CSH) entorno a granos sólidos, en algunos casos formando "enizos"
- Granos sólidos de diferentes tamaños

Figuras de la matriz adherida

Figura A-33. Imágenes MEB de la fibra MH2/10/R

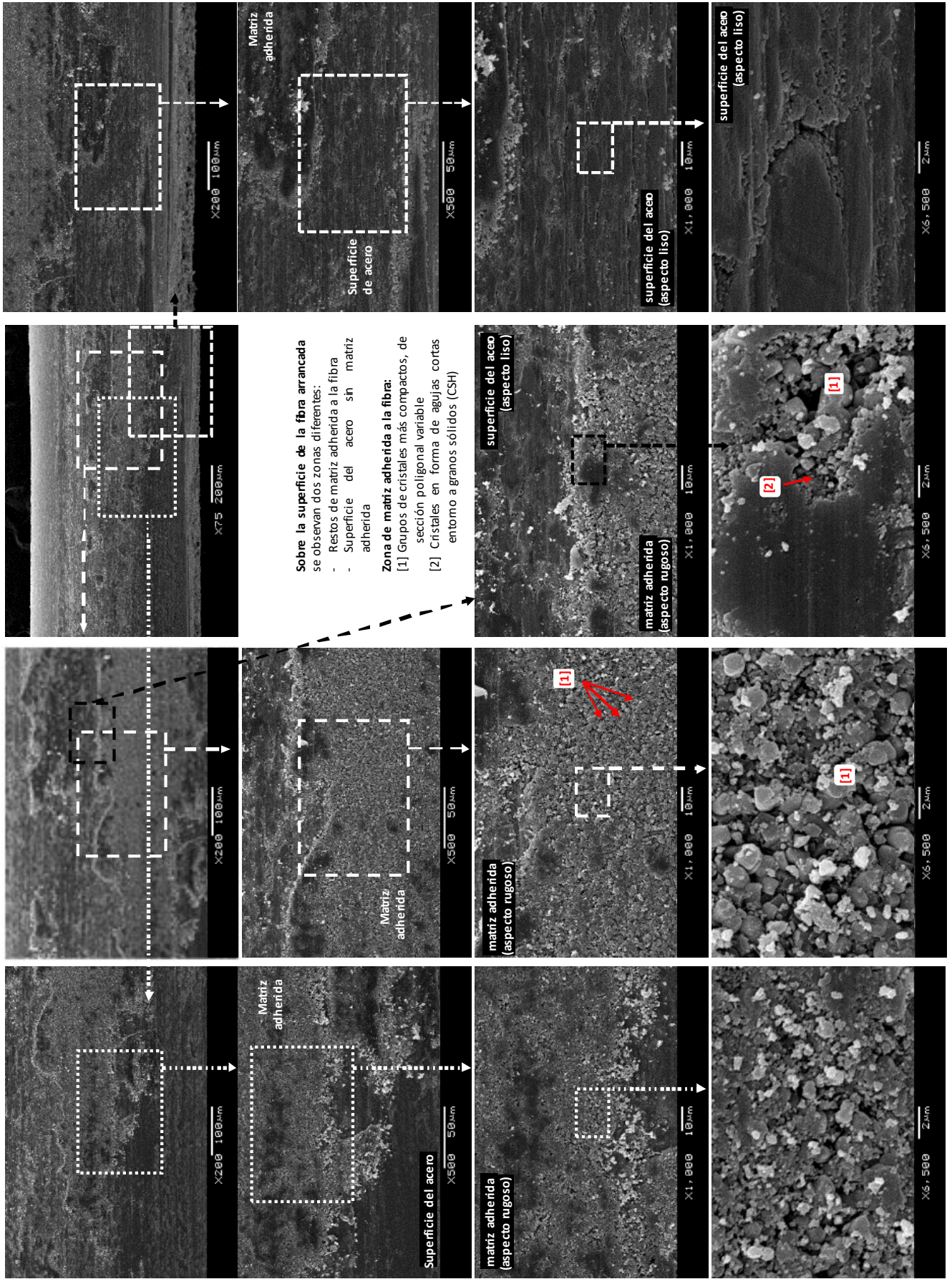


Figura A-34. Imágenes MEB de la fibra MH2/10/R

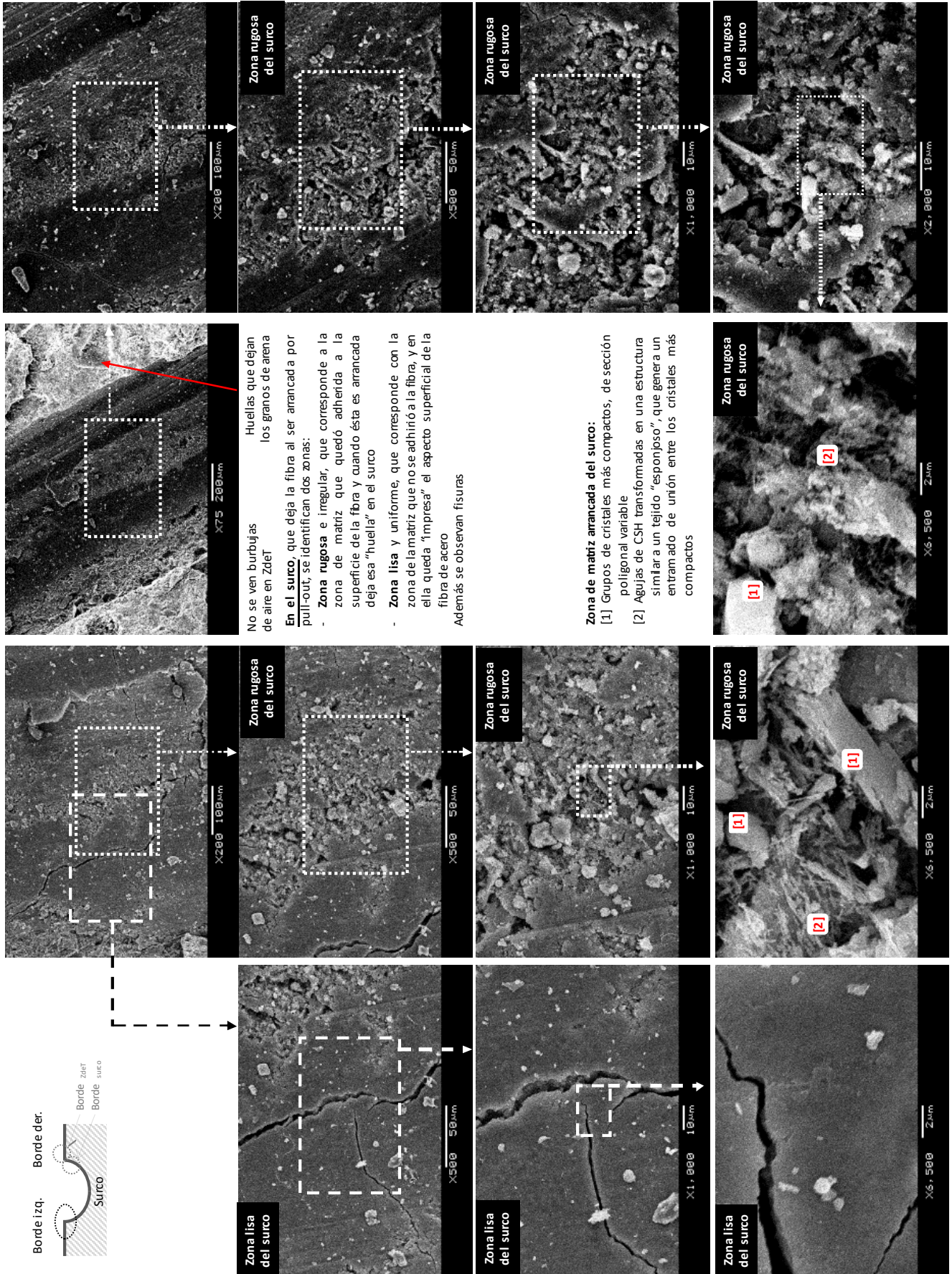


Figura A-35. Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R

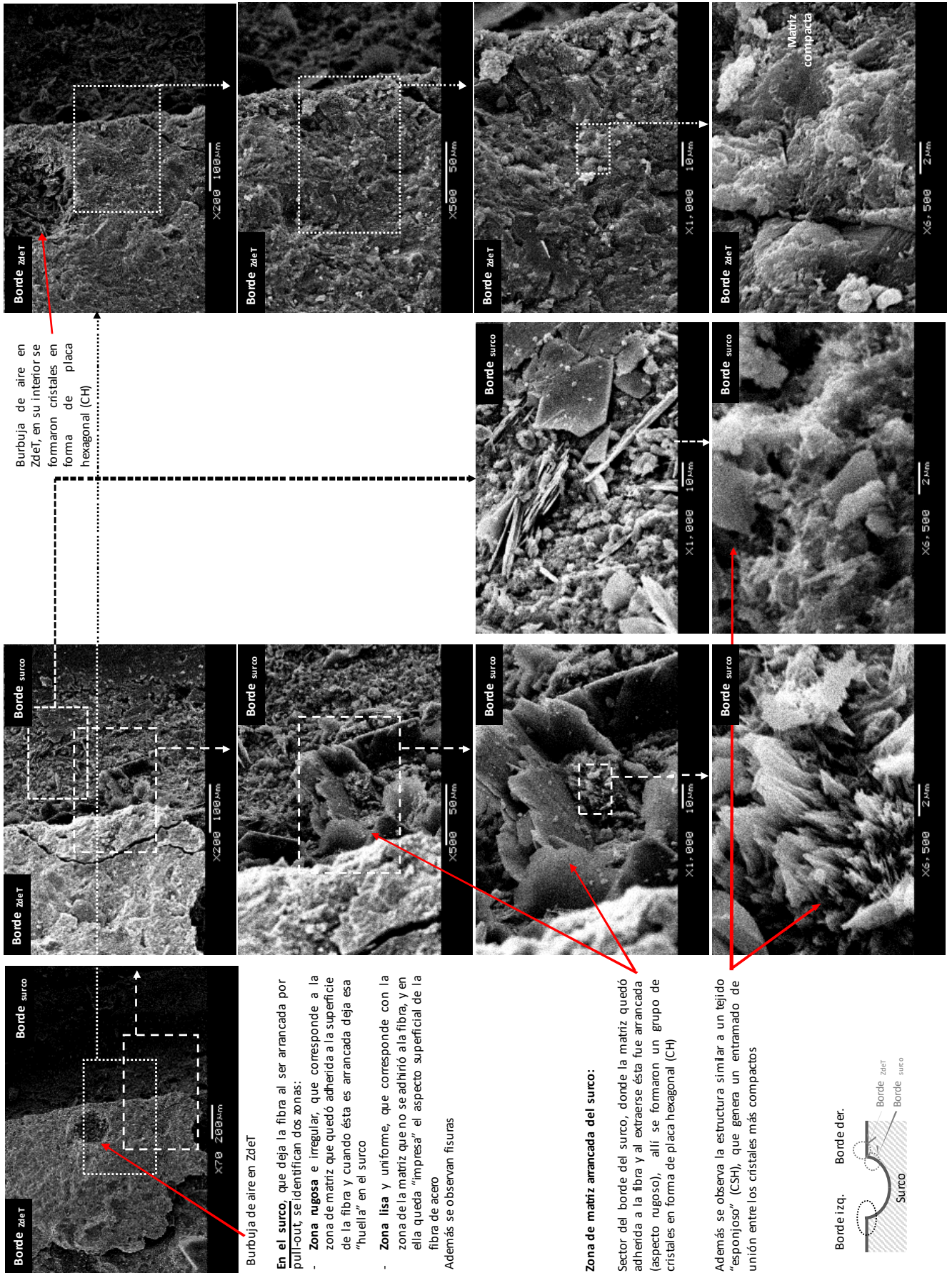


Figura A-36. Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R

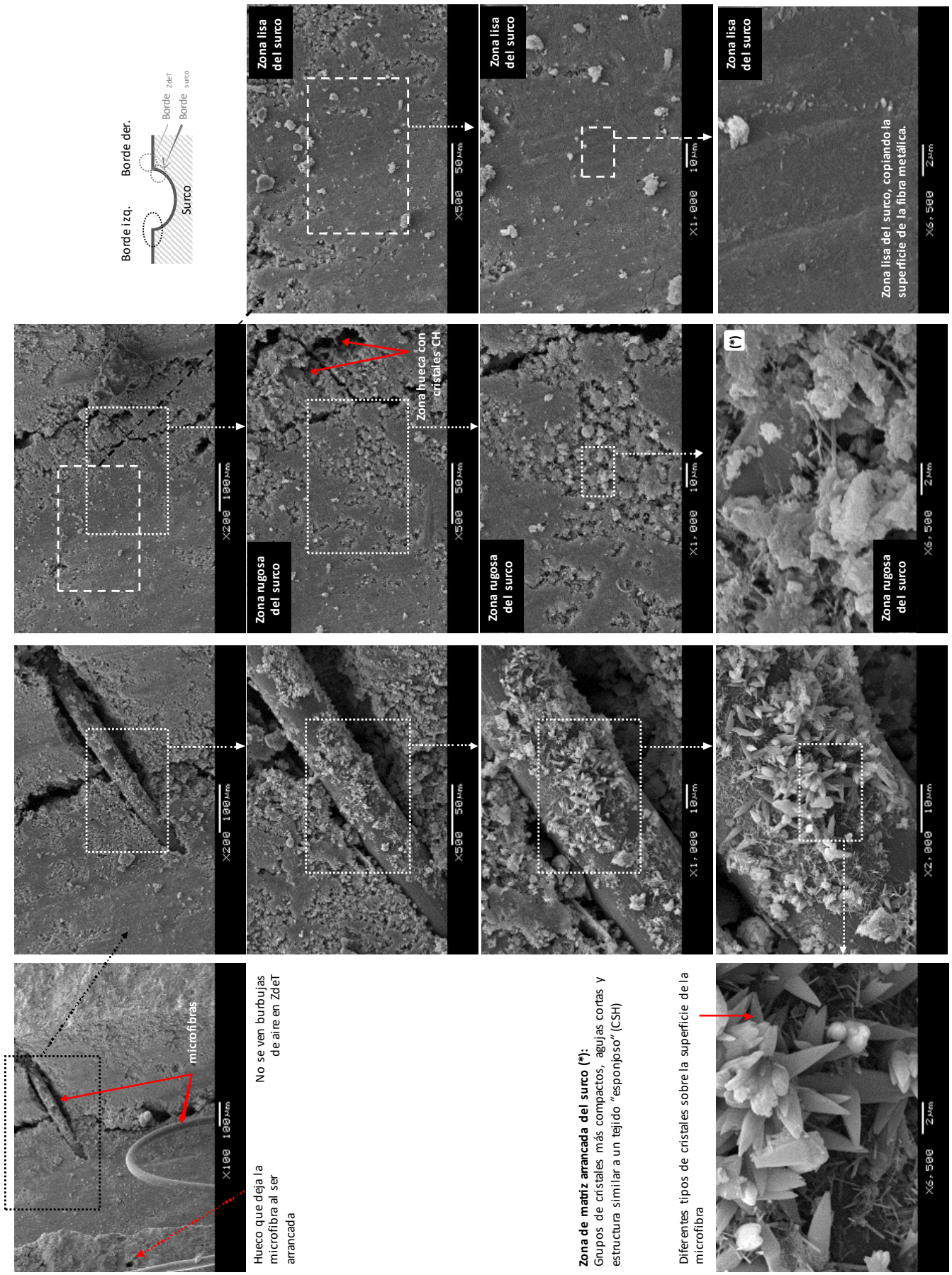
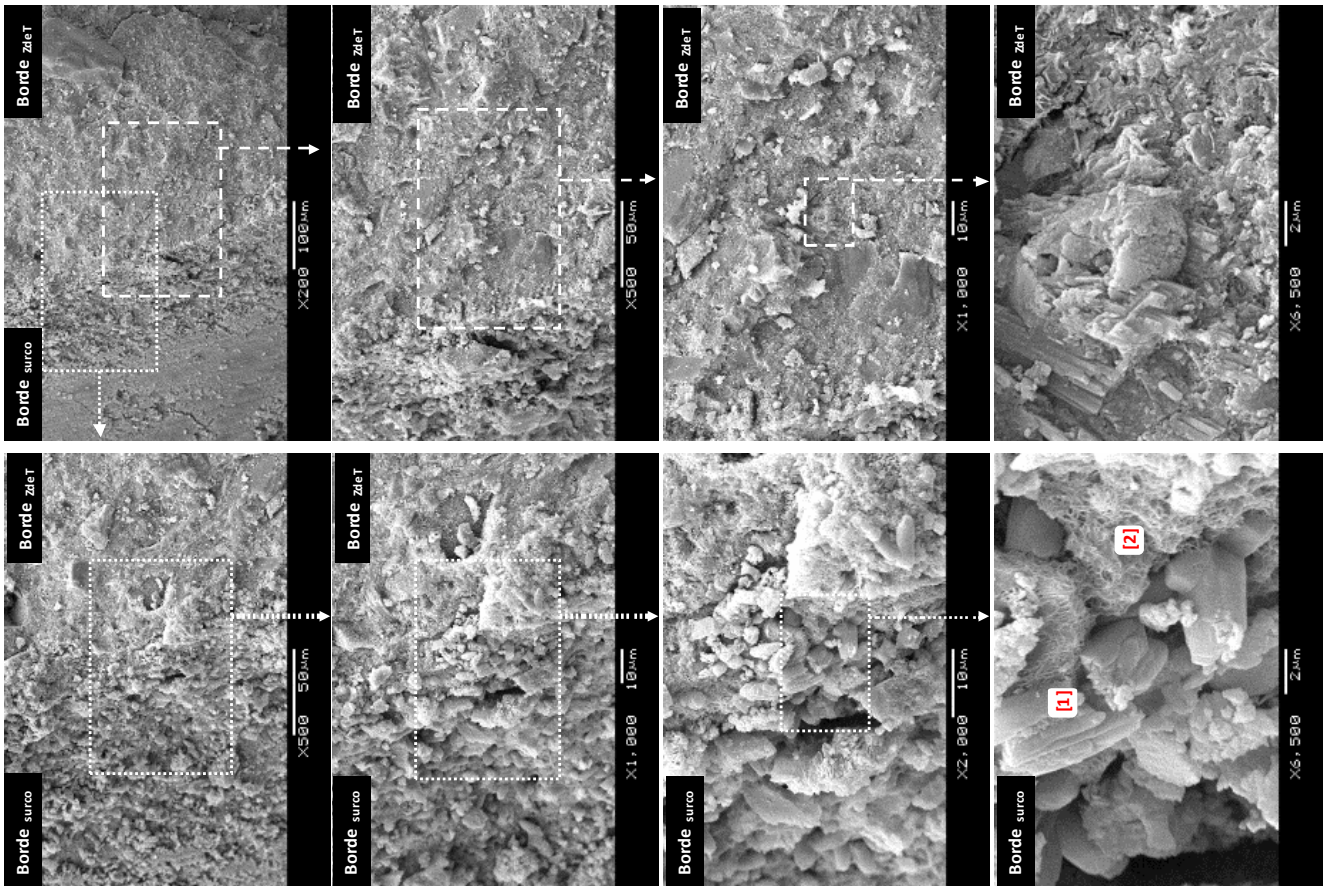
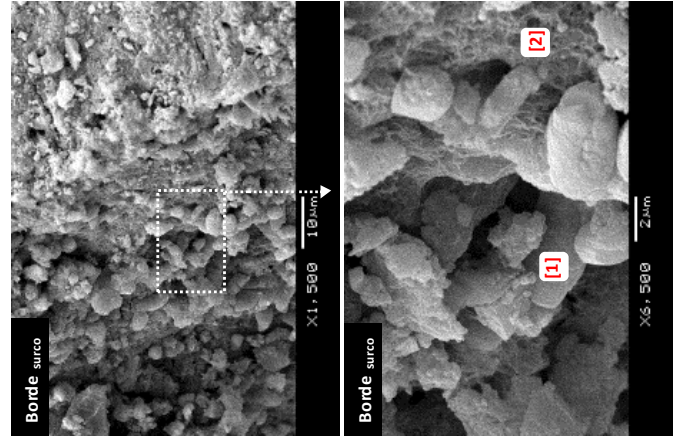
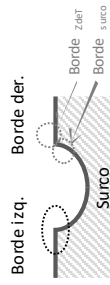


Figura A-37. Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R



No se ven burbujas de aire en ZrTe



Zona rugosa del surco:
 [1] Grupos de cristales más compactos, de sección poligonal variable
 [2] Agujas de CSH transformadas en una estructura similar a un tejido "esponjoso", que genera un entramado de unión entre los cristales más compactos

Figura A-38. Imágenes MEB de la matriz MH2/10/R

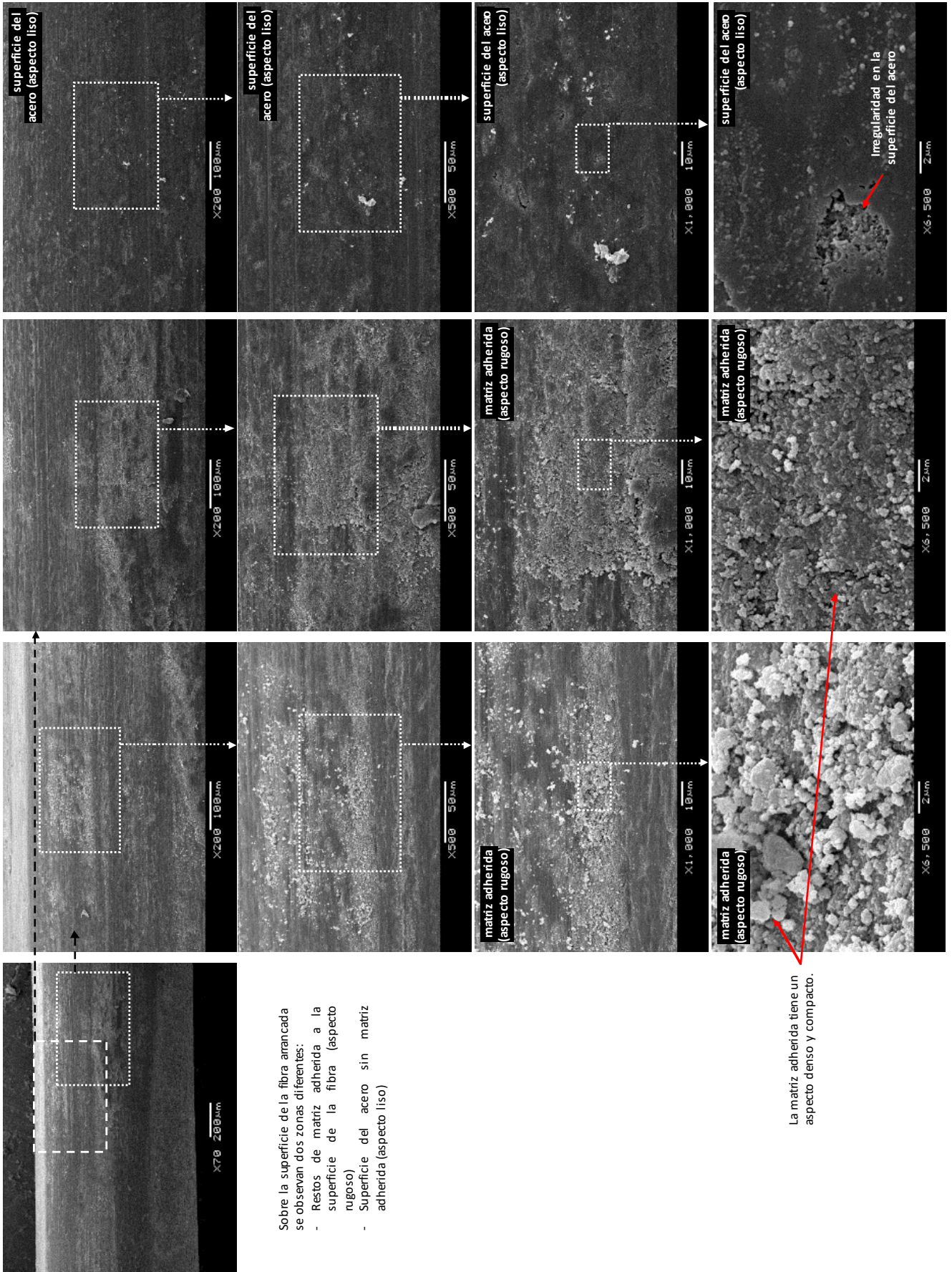
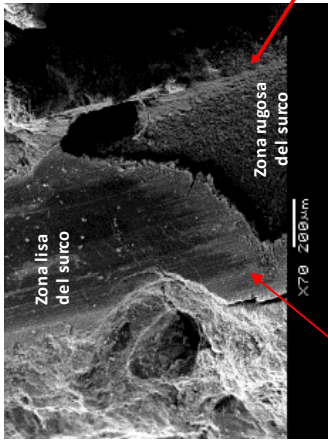
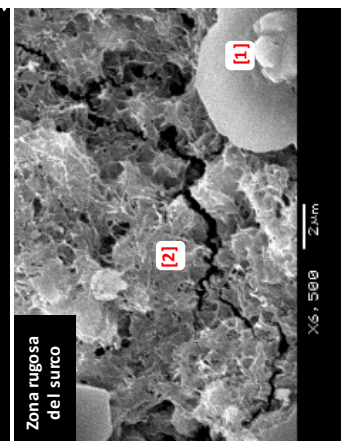
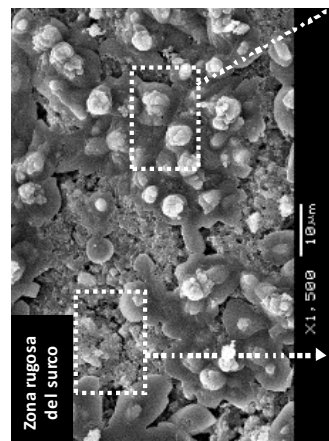
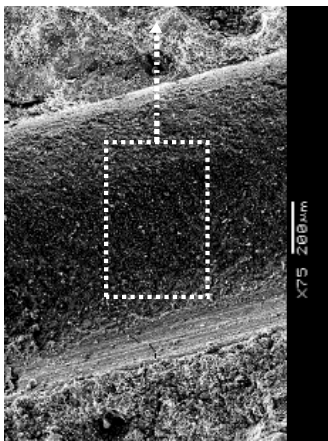
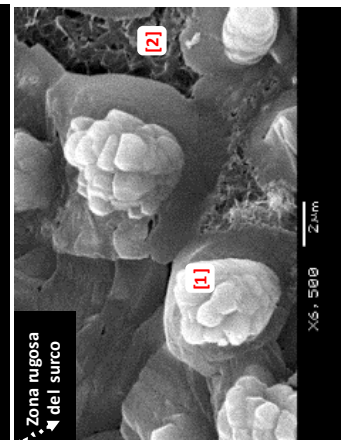
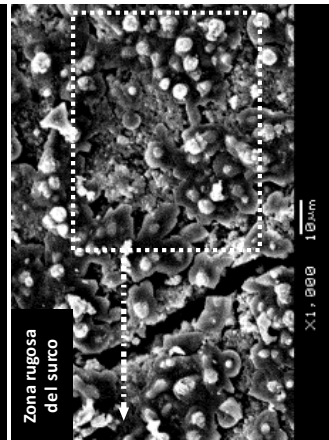
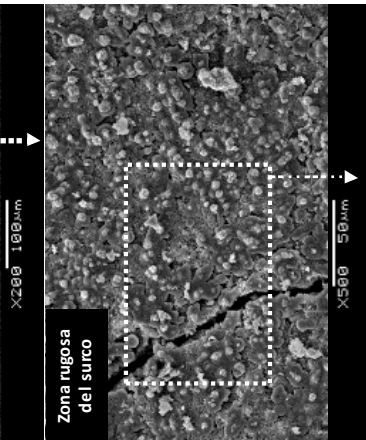
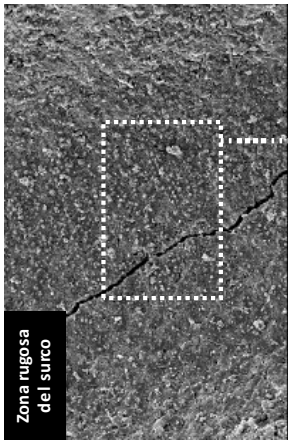


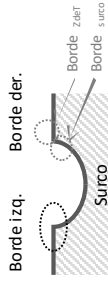
Figura A-39. Imágenes MEB de la fibra MH2/15/R



La **zona lisa del surco**, está en el arranque del borde superior de la muestra. Sin ser este sector, todo el resto del surco se veía rugoso (como se ve en la parte de debajo de la imagen)



Zona rugosa del surco (matriz arrancada):
 [1] Grupos de cristales más compactos, de sección poligonal variable
 [2] Agujas de CSH transformadas en una estructura similar a un tejido "esponjoso", que genera un entramado de unión entre los cristales más compactos



En el **surco**, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa e irregular**, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
 - **Zona lisa y uniforme**, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero
- Además se observan fisuras

Zona lisa del surco, sin adherencia F-M, donde se ve la "huella" de la superficie de la fibra de acero.

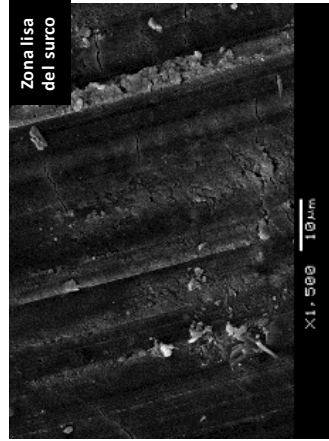
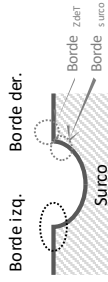
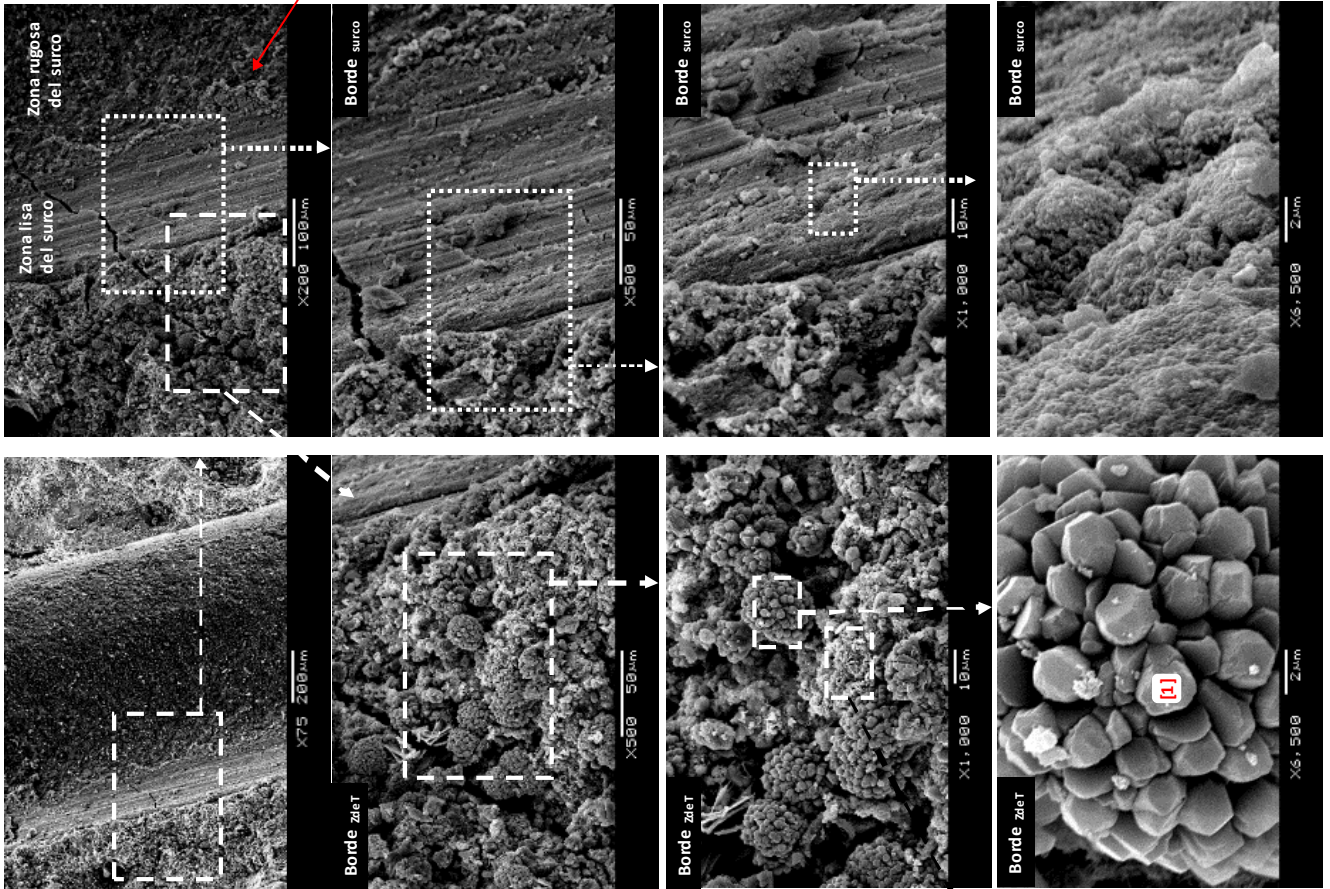


Figura A-40. Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R



En el **surco**, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

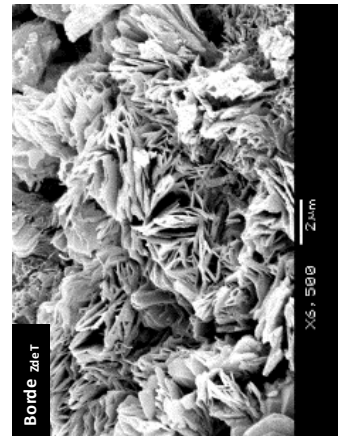
- **Zona rugosa** e irregular, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- **Zona lisa** y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

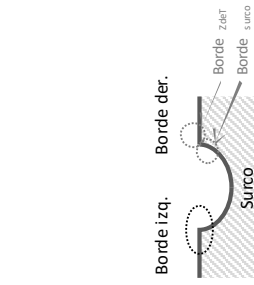
Además se observan fisuras

Matriz densa y compacta

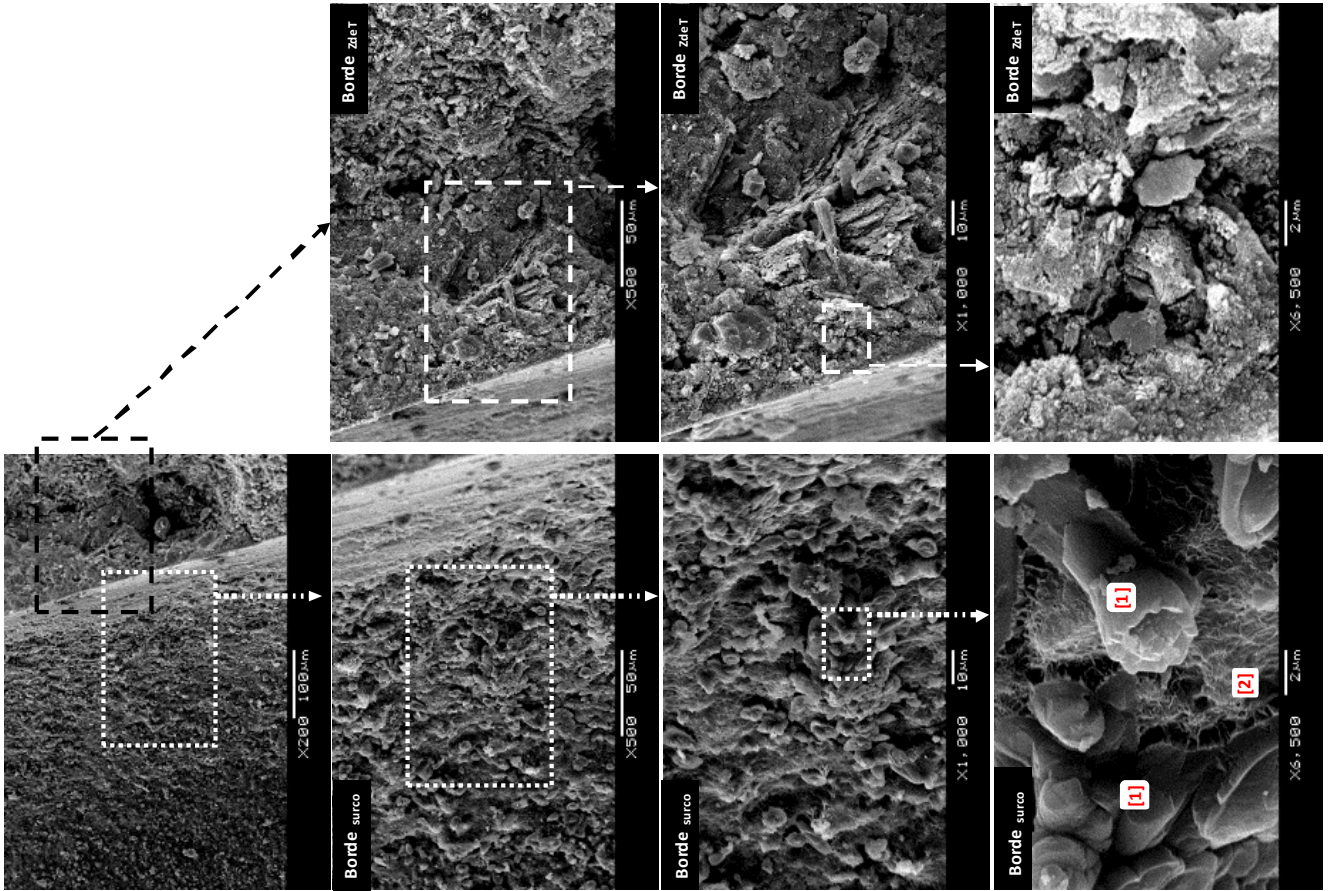
ZdeT entre F-M:

- [1] Grupos de cristales más compactos, de sección poligonal variable
- [2] Agujas de CSH transformadas en una estructura similar a un tejido "esponjoso", que genera un entramado de unión entre los cristales más compactos





En la ZdeT entre la Fibra y la Matriz



Zona rugosa ocupando la mayor parte de la superficie del surco

En el **surco**, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa** e irregular, que corresponde a la zona de matriz quedado adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja es a "huella" en el surco
 - **Zona lisa** y uniforme, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero
- Además se observan fisuras

Zona rugosa del surco (matriz arrancada):

- [1] Grupos de cristales más compactos, de sección poligonal variable
- [2] Agujas de CSH transformadas en una estructura similar a un tejido "esponjoso", que genera un entramado de unión entre los cristales más compactos

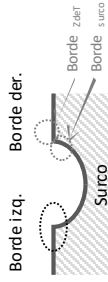
En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa e irregular**, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco

- **Zona lisa y uniforme**, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras

criscales en forma de placa hexagonal (CH)



Zona rugosa del surco (matriz arrancada):

- [1] Grupos de cristales más compactos, de sección poligonal variable
- [2] Agujas de CSH transformadas en una estructura similar a un tejido "esponjoso", que genera un entramado de unión entre los cristales más compactos

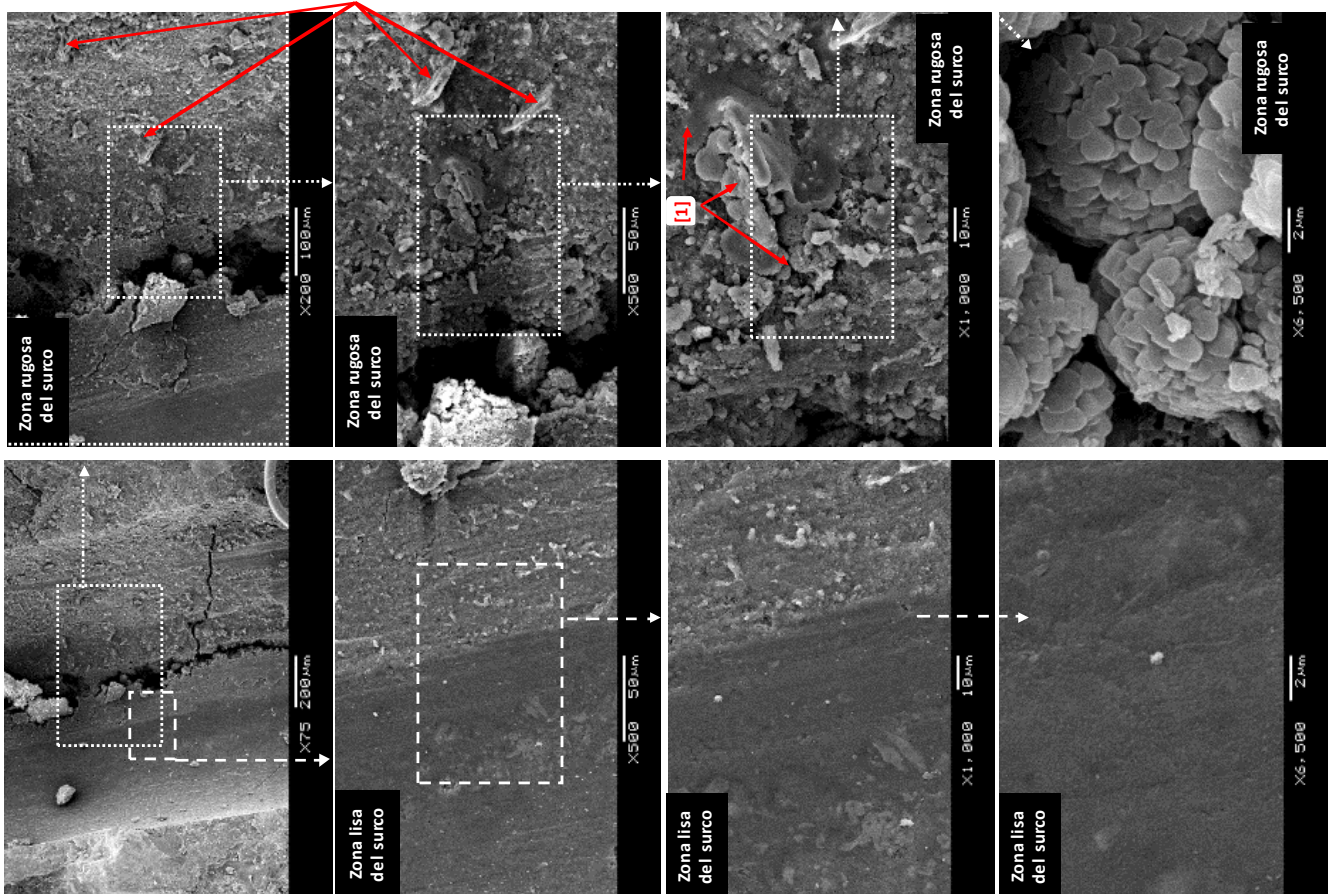
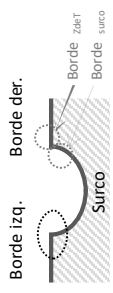
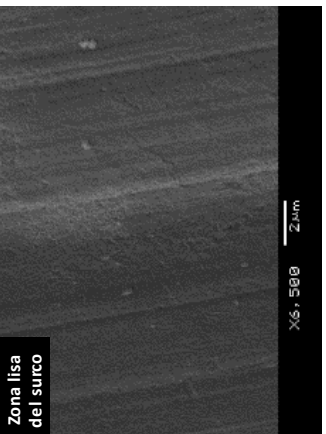
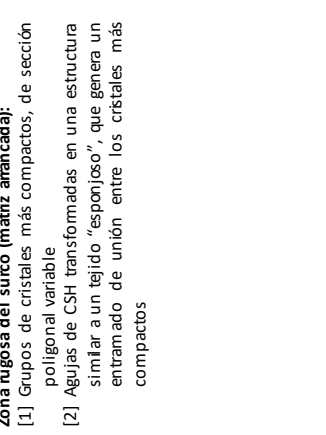
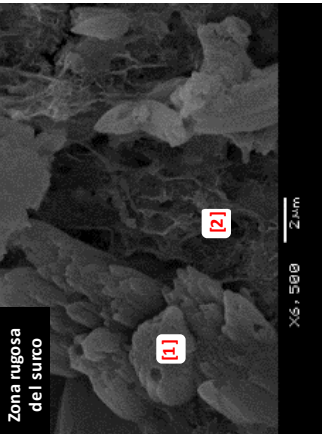
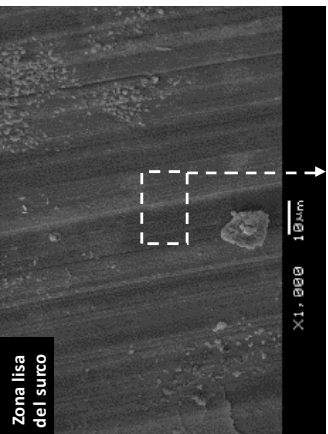
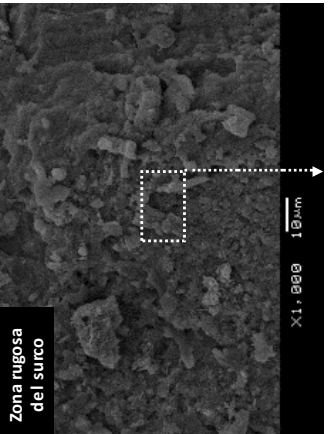
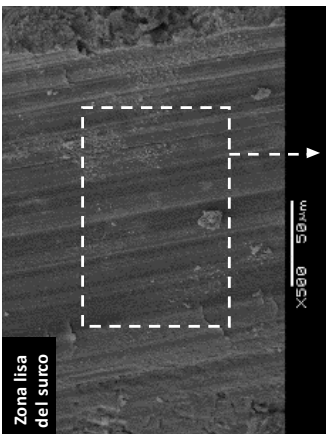
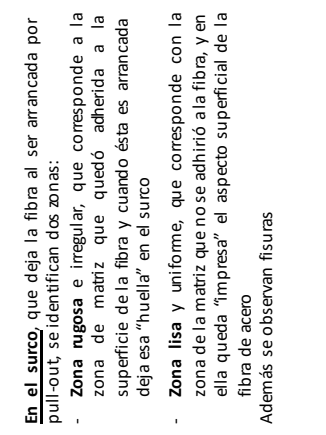
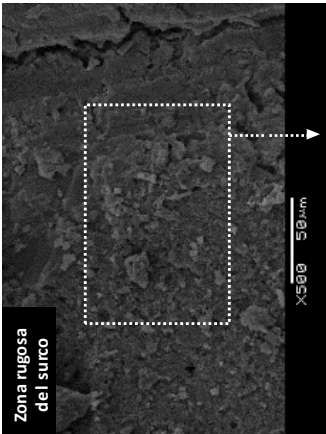
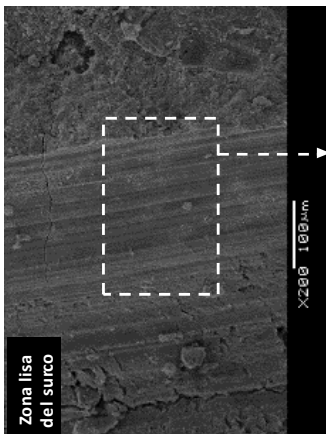
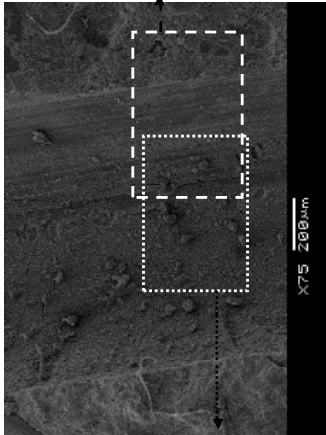
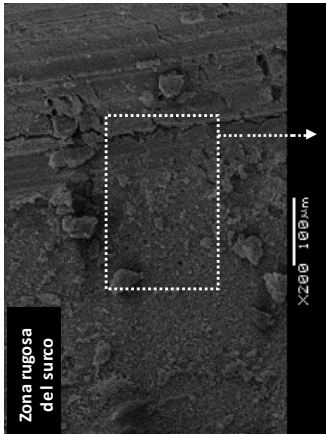


Figura A-43. Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R



En el surco, que deja la fibra al ser arrancada por pull-out, se identifican dos zonas:

- **Zona rugosa e irregular**, que corresponde a la zona de matriz que quedó adherida a la superficie de la fibra y cuando ésta es arrancada deja esa "huella" en el surco
- **Zona lisa y uniforme**, que corresponde con la zona de la matriz que no se adhirió a la fibra, y en ella queda "impresa" el aspecto superficial de la fibra de acero

Además se observan fisuras

Zona lisa del surco, sin adherencia F-M, donde se ve la "huella" de la superficie de la fibra de acero.

Figura A-45. Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R

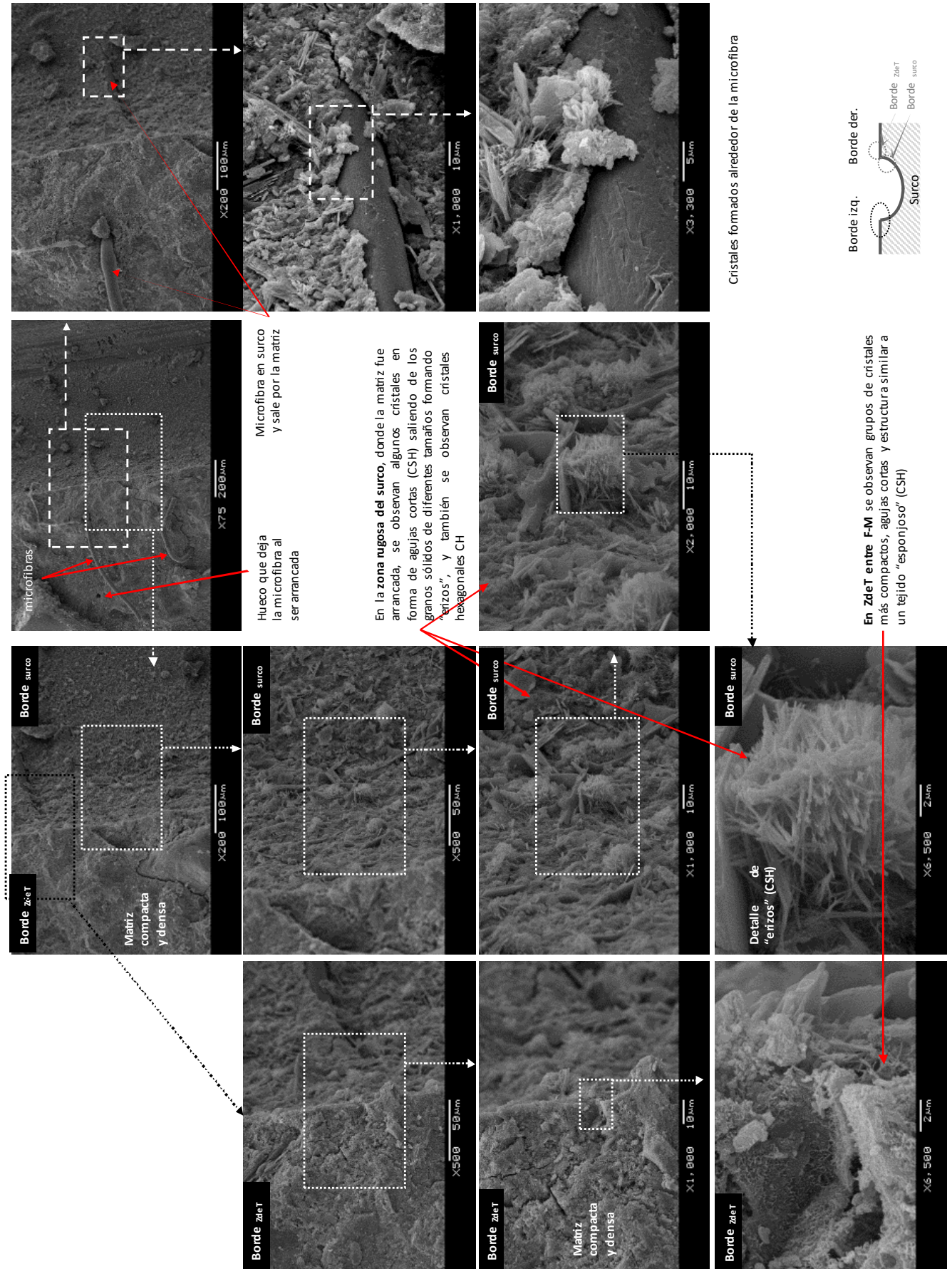


Figura A-46. Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R

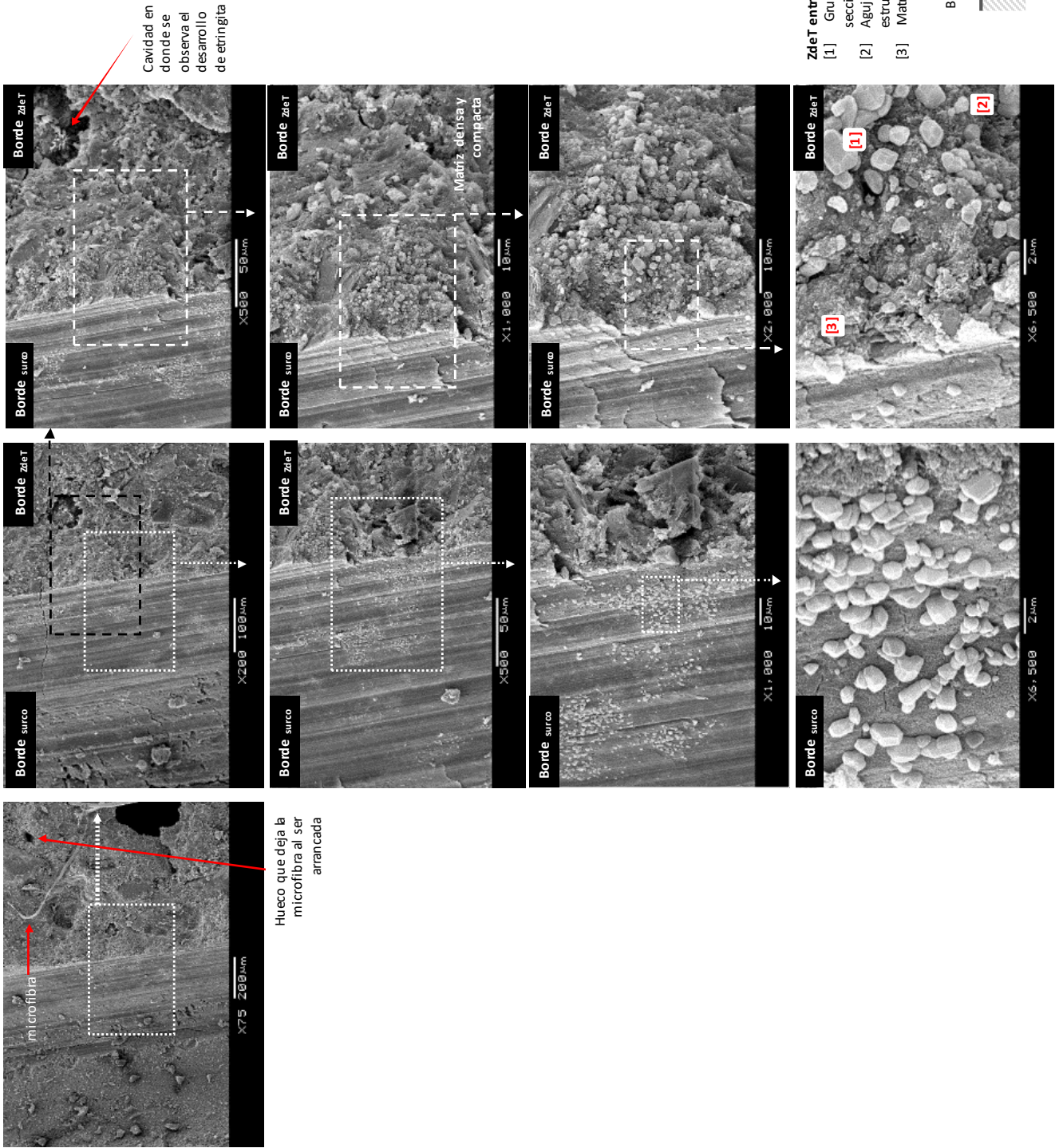


Figura A-47. Imágenes MEB de la matriz MH2/15/R