

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PROFESOR PATROCINANTE:

DR. JOSÉ NORAMBUENA CONTRERAS (UBB)

PROFESOR CO-GUÍA:

ING. MANUEL CHÁVEZ DELGADO (UNAB)

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE
AUTO-MONITORIZACIÓN DE MORTEROS
REFORZADOS CON RESIDUOS METÁLICOS**

**PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

ARIEL CARTES MUÑOZ

Concepción, Marzo de 2017

DEDICATORIA

A mis padres Sergio y Flor, por todo lo que han hecho por mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía Dr. José Norambuena, por su constante ayuda, disposición y confianza durante todo este proceso de investigación. Además, quiero destacar su compromiso con la investigación científica que fue uno de los factores que me motivó durante el desarrollo de este estudio.

Del mismo modo, quiero agradecer al equipo del LabMat, al Ing. José Luis por su ayuda y compañía durante la realización de los ensayos. A la Mg. Irene González-Torre por su capacitación con los equipos de laboratorio y ayuda con la planificación de las distintas actividades realizadas en esta investigación.

Agradezco también al Dr. Roque Borinaga, docente de la Universidad del País Vasco por su ayuda con la fabricación de probetas al inicio de este proceso y por resolver mis dudas durante el análisis de resultados. Al Ing. Manuel Chávez, docente de la Universidad Andrés Bello por facilitarnos el Laboratorio de Ingeniería Civil de su universidad y por toda la ayuda durante este proceso. A la Laboratorista de la Universidad Andrés Bello Olga Iturra, por su ayuda durante la fabricación de probetas.

Quiero agradecer de manera muy especial a mis padres, Sergio y Flor, porque sin su arduo esfuerzo y constante apoyo nada de esto sería posible. Espero poder algún día ayudarlos a que disfruten la vida de la manera que se lo merecen. Agradezco a mis hermanos, Miguel, Pablo y Sergio por su compañía y cariño que siempre me han brindado. Además, agradezco a mis abuelos, sobrinos, tíos, primos y amigos porque todos quienes forman o han formado parte de mi vida son parte de este logro.

Finalmente, quiero agradecer a mi compañera durante este proceso y durante toda mi vida universitaria, Javiera Quilodrán, gracias por todo el cariño y todos los momentos felices.

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE AUTO-MONITORIZACIÓN DE MORTEROS REFORZADOS CON RESIDUOS METÁLICOS

Ariel Cartes Muñoz

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

aricarte@alumnos.ubiobio.cl

Dr. José Norambuena Contreras

LabMAT, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

jnorambuena@ubiobio.cl

Ing. Manuel Chávez Delgado

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Andrés Bello

manuel.chavez@unab.cl

RESUMEN

En esta investigación se ha evaluado la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos en las propiedades mecánicas y de auto-monitorización del daño en morteros de cemento. Con este objetivo, nueve diferentes morteros, con la misma relación agua/cemento, pero con dos diferentes residuos metálicos (fibras y virutas de acero), y cuatro diferentes porcentajes de adición (4 a 16% s/c) han sido fabricados y evaluados a dos diferentes edades de curado (7 y 28 días). De este modo, en esta investigación se midieron las resistencias a la flexión y a la compresión, y los módulos elásticos estático por compresión y dinámico por ultrasonidos de los morteros. Además, se desarrolló un estudio exploratorio con el objetivo de evaluar la monitorización del daño por agrietamiento en morteros reforzados con residuos metálicos a través del incremento de la resistencia eléctrica. Los principales resultados de este estudio mostraron que la adición de residuos metálicos reduce la densidad aparente e incrementa la porosidad de los morteros. Además, se ha observado que las resistencias a la flexión y compresión aumentaron proporcionalmente con el contenido de residuos metálicos adicionado. Sin embargo, mediante un análisis de probabilidad se comprobó que la adición de residuos metálicos no presentó un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas de los morteros. Adicionalmente, en este estudio se comprobó que existe una relación no-lineal entre la resistencia eléctrica y el ancho de grieta, ajustada a ecuaciones potenciales, que podrían utilizarse para determinar el daño en los morteros con virutas y fibras. Además, se ha observado que todos los contenidos de residuos metálicos utilizados en este estudio contribuyen con la monitorización del daño. Sin embargo, se recomienda incorporar un 4% de residuos metálicos debido a que este contenido mejora las propiedades mecánicas y físicas del mortero. Finalmente, esta investigación ha permitido concluir que los morteros con residuos metálicos podrían ser potencialmente utilizados para el desarrollo de nuevos materiales cementicios con propiedades mecánicas mejoradas y propiedades de auto-monitorización del daño.

Palabras claves: Mortero de cemento; Residuos metálicos; Propiedades físicas; Propiedades mecánicas; Monitorización del daño.

10240 + 24 Figuras/Tablas*250 + 2 Figura/Tabla* 500 = 17240 Palabras Totales

MECHANICAL AND SELF-MONITORING BEHAVIOUR OF CEMENT MORTARS REINFORCED WITH METALLIC WASTE

Ariel Cartes Muñoz

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
aricarte@alumnos.ubiobio.cl

José Norambuena Contreras, Ph.D

LabMAT, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
jnorambuena@ubiobio.cl

Manuel Chávez Delgado, C.E

Department of Civil Engineering, University Andrés Bello
manuel.chavez@unab.cl

ABSTRACT

In this research, the influence of the type and content of metallic waste on the mechanical and damage self-monitoring properties of cement mortars has been evaluated. With this purpose, nine different mortars with the same water/cement ratio but using two different metallic wastes (Steel fibres and shavings) added in four different percentages (4 to 16% w/c) were manufactured and evaluated at two different curing ages (7 and 28 days). Thus, flexural and compression strength, static elastic modulus by compression and dynamic elastic modulus by ultrasonic tests were measured in mortars. In addition, an exploratory study was carried out with the aim of evaluating the cracking damage monitoring of metallic waste reinforced mortars by measuring the increase of the electrical resistance. The main results of this study showed that the addition of metallic wastes reduced the bulk density and increased the porosity of the mortars. Additionally, it was observed that flexural and compression strength proportionally increased with the increase of the metallic waste content. However, after a probability analysis it was proven that the addition of metallic waste did not present a significant effect on the mechanical properties of the mortars. It was also demonstrated that there is a non-linear relationship between the electrical resistivity and the crack width, fitted to potential equations that could be used to determine the damage in mortars reinforced with fibres and shavings. Moreover, it was observed that all metallic waste contents used in this study contribute to the damage monitoring. However, the addition of 4% of metallic waste is recommended with the purpose of improving the mechanical and physical properties of the mortar. Finally, this research concluded that mortars with metallic waste could be potentially used to develop new cementitious materials with improved mechanical properties and damage self-monitoring properties.

Keywords: Cement mortar; Metallic waste; Physical properties; Mechanical properties; Damage monitoring.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	HIPÓTESIS	3
1.3	OBJETIVOS	3
1.3.1	<i>Objetivos generales</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
1.4	DECLARACIÓN DE AUTOR	4
2	MATERIALES Y MÉTODOS	4
2.1	MATERIALES	4
2.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	6
2.3	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMAS	7
2.4	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS	7
2.5	ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA SUPERFICIE DE FALLA DE LOS MORTEROS USANDO SEM	8
2.6	DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD DE LAS MUESTRAS	8
2.7	MEDIDA DE LAS PROPIEDADES DE FLEXIÓN Y COMPRESIÓN EN LAS MUESTRAS	9
2.8	MEDIDA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO USANDO ULTRASONIDO	9
2.9	MONITORIZACIÓN DEL DAÑO POR AGRIETAMIENTO EN LAS MUESTRAS CON RESIDUOS METÁLICOS	11

2.10	VARIABLES EXPERIMENTALES EVALUADAS EN ESTE ESTUDIO	12
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
3.1	ANÁLISIS DE LA MORFOLOGÍA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS CORTADOS MECÁNICAMENTE	12
3.2	INFLUENCIA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS	15
3.3	INFLUENCIA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MORTEROS	18
3.4	EVALUACIÓN DE LA MONITORIZACIÓN DEL DAÑO POR AGRIETAMIENTO EN MORTEROS DE CEMENTO CON RESIDUOS METÁLICOS	25
4	CONCLUSIONES	31
5	REFERENCIAS	33

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición química de los óxidos medida mediante XRF para el cemento Portland-Puzolánico y arena fina utilizada en este estudio.	4
Tabla 2.	Análisis elemental medido mediante EDXS para los residuos metálicos reciclados usados en este estudio.....	6
Tabla 3.	Proporciones en peso y volumen de las materias primas utilizadas en la fabricación de los morteros.	6
Tabla 4.	Variables incluidas en el estudio experimental.	12
Tabla 5.	Longitud y ancho promedio de las virutas de acero clasificadas por tipología.....	14
Tabla 6.	Ratios de los valores promedios de los módulos elásticos.....	24

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imágenes ópticas (a-b) e imágenes SEM (c-d) de las fibras de lana de acero y virutas de acero.....	5
Figura 2. Tipología de las virutas de acero utilizadas: medición de la longitud y ancho.....	8
Figura 3. Medida del módulo de elasticidad dinámico de los morteros mediante ensayo por ultrasonido.	10
Figura 4. (a) Montaje de la monitorización del daño por agrietamiento; (b) medición del agrietamiento y variación de la resistencia eléctrica en las muestras con residuos metálicos.	11
Figura 5. Gráfico de probabilidad-probabilidad tipo Weibull de la (a) longitud y ancho de las virutas metálicas, y (b) longitud y diámetro de las fibras metálicas.....	13
Figura 6. Histograma de frecuencias basado en la función de probabilidad tipo Weibull para la (a) longitud y (b) ancho de las virutas.	15
Figura 7. Histograma de frecuencia basado en la función de probabilidad tipo Weibull para la (a) longitud, y (b) diámetro de las fibras.....	15
Figura 8. Relación entre la (a) densidad aparente y la (b) porosidad de las muestras para diferentes contenidos de residuos metálicos y tiempos de curado.	16
Figura 9. Resultados de la densidad aparente en función de la porosidad medidas en las muestras de mortero.....	17
Figura 10. Resultados promedio de la resistencia a la (a) flexión y (b) compresión para diferentes tiempos de curado y contenidos de residuos metálicos.....	19
Figura 11. Idealización del agrietamiento producido durante los ensayos de (a) flexión y (b) compresión en muestras de morteros con (c) virutas y (d) fibras.....	20
Figura 12. Imágenes SEM de la superficie de fractura en muestras con (a) virutas y (b) fibras metálicas.	21
Figura 13. Gráficos probabilidad-probabilidad para los valores de fuerza máxima a la (a) flexión y (b) compresión.....	21
Figura 14. Resultados promedio de los módulos elásticos por compresión y ultrasonido para muestras de mortero con (a) virutas y (b) fibras.....	22
Figura 15. Relación entre los módulos elásticos por compresión y ultrasonido, para las distintas muestras de mortero con residuos metálicos.	23

Figura 16. Gráficos probabilidad-probabilidad de la razón entre los valores de los módulos elásticos con residuo y sin residuo, para muestras de morteros con (a) virutas y (b) fibras.	25
Figura 17. Resultados de la resistencia eléctrica medida en las muestras de mortero con residuos metálicos en función del ancho de la grieta.....	26
Figura 18. Gráfico probabilidad-probabilidad para los valores de resistencia eléctrica en muestras de mortero con virutas y fibras.	27
Figura 19. Distribución de la resistencia eléctrica obtenidas en muestras de mortero con (a) virutas y (b) fibras.	28
Figura 20. Aumento de la resistencia eléctrica con el aumento del ancho de la grieta, hasta un ancho de grieta máximo de 1 mm.....	29

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Un mortero de cemento es un material de construcción usado en la ingeniería civil. Sin embargo, las condiciones ambientales adversas combinadas con las cargas externas, reducen su resistencia mecánica y durabilidad en el tiempo (Cao & Chung, 2002; Çavdar, 2014; Zhutovsky & Hooton, 2017; Liu & Hansen, 2015; Koenig & Dehn, 2016). Con el objetivo de mejorar su resistencia mecánica se pueden incorporar a la matriz del mortero diferentes tipos de refuerzos, como partículas trituradas o fibras (Bentur & Mindess, 2007). En general, los materiales de refuerzo se caracterizan por mejorar las propiedades mecánicas de los materiales cementicios (Bentur & Mindess, 2007; Banthia & Dubeau, 1994; Brandt, 2008; Kim et al., 2014; Yoo et al., 2013; Quadir et al., 2016; Pacheco-Torgal, 2011; Norambuena-Contreras et al., 2016). En este contexto, Banthia & Dubeau, 1994 han demostrado experimentalmente que el uso de fibras de carbono y acero aumentan la capacidad de adherencia del mortero reforzado en comparación con un mortero convencional. Sin embargo, las mejoras en las propiedades de los materiales cementicios reforzados dependen principalmente de la morfología y el tipo del refuerzo utilizado (Brandt, 2008). Entre los refuerzos del tipo partículas más usados para mejorar la resistencia mecánica de los materiales a base de cemento están los granos y polvo de acero y carbono (Quadir et al., 2016) y virutas de acero trituradas (Banthia & Dubeau, 1994). Asimismo, entre las fibras se encuentran: fibras vegetales (palma, celulosa, cáñamo, etc.) (Pacheco-Torgal, 2011), fibras de carbono (Norambuena-Contreras et al., 2016), fibras sintéticas (polipropileno, polietileno, alcohol polivinílico, etc.) (Nishiwaki et al., 2012) y fibras metálicas (Sengul, 2016; Graeff et al., 2012; Holschemacher et al., 2010; Wang & Wang, 2013; Wu et al., 2016). Sin embargo, el alto costo de las fibras comerciales, así como la búsqueda de materiales más amigables con el medio ambiente, han despertado un especial interés en el uso de residuos metálicos reciclados procedentes de la industria (Norambuena-Contreras et al., 2016). En este contexto, autores como Quadir et al., 2016, Martinelli et al., 2015, Sengul, 2016, y Graeff et al., 2012 han utilizado granos de acero reciclado y fibras de acero recicladas de neumáticos fuera de uso para el refuerzo mecánico de morteros y hormigones. Quadir et al., 2016 han sustituido de manera parcial los áridos finos de hormigones por granos de acero reciclado. Como principal resultado, la resistencia a la flexión de los hormigones reforzados con granos de acero reciclado fue un 38% superior al hormigón sin refuerzo. Además, Martinelli et al., 2015 han ensayado muestras de hormigón reforzadas con dos diferentes tipos de fibras (fibras de acero comercial y fibras de acero recicladas) y diferentes

porcentajes de adición. En su investigación han observado que las muestras con mayor porcentaje de fibras recicladas presentan una menor resistencia mecánica. En resumen, las fibras comerciales no pueden ser reemplazadas en su totalidad por fibras recicladas, debido a la disminución significativa de sus propiedades mecánicas. Asimismo, Sengul, 2016 demostró que las fibras de acero recicladas procedentes de neumáticos fuera de uso (diámetro 0.1-2mm), pueden ser usadas para reforzar materiales a base de cemento, aunque las propiedades mecánicas de compresión y flexión sean menores en comparación con un material reforzado con fibras metálicas comerciales. Asimismo, Wu et al., 2016 han señalado que una de las desventajas que conlleva la adición de fibras es la reducción de su trabajabilidad, lo que puede afectar a la microestructura y las propiedades físicas del material a base de cemento. Lee & Jacobsen, 2011 han evaluado usando microscopía electrónica de barrido (SEM) la microestructura de morteros con fibras de acero, concluyendo que la porosidad existente en la interfaz matriz-fibras aumenta la porosidad total del mortero. De este modo, este aumento en la porosidad total puede producir una disminución en las propiedades mecánicas del mortero. Sin embargo, este efecto adverso puede variar dependiendo de la cantidad de fibras metálicas adicionadas a la matriz del mortero (Lee & Jacobsen, 2011) y del tipo de ensayo mecánico utilizado para evaluar el efecto de las fibras. En este contexto, Graeff et al., 2012 evalúan el efecto de las fibras de acero en hormigones usando ensayos dinámicos de fatiga. En su estudio concluyen que el principal efecto de las fibras metálicas en los materiales a base de cemento, es mejorar el comportamiento mecánico del material posterior a la aparición de fisuras. Sin embargo, la presencia de fisuras y su detección temprana en materiales cementicios reforzados con fibras, sigue siendo un problema a resolver para incrementar la seguridad, durabilidad y resistencia de las estructuras. De este modo, las investigaciones actuales han centrado su interés en el desarrollo de nuevos materiales cementicios, con propiedades avanzadas de auto-reparación de sus grietas usando agentes sanates (Jonkers et al., 2010; Sierra-Beltran et al., 2014; Huang et al., 2016), y de auto-monitorización del daño (Chung, 1998; Chung, 2012; Meehan et al., 2010; Nguyen et al., 2015; Pour-Ghaz, 2011; Pour-Ghaz et al., 2013). El monitoreo del agrietamiento en materiales cementicios es posible debido a dos factores: i) la incorporación de fibras eléctricamente conductoras a la matriz cementicia, y ii) la medida de la variación de la resistencia eléctrica del material compuesto conductor bajo carga. Investigaciones como las de Chung, 1998 y 2012 y Meehan et al., 2010, han estudiado la variación de la resistencia eléctrica en morteros reforzados con fibras de carbono bajo ensayos de tracción y compresión, ambos de manera estática y dinámica. Ensayos dinámicos han demostrado que la resistencia eléctrica del

mortero aumenta debido a la extracción de la fibra y disminuye con el empuje de estas, concluyendo que la variación de la resistencia eléctrica en el mortero es función del daño mecánico producido en el material (Chung, 1998; Chung, 2012; Meehan et al., 2010). Asimismo, Nguyen et al., 2015 han evaluado la detección de daños en morteros reforzados con fibras de acero, midiendo los cambios de resistencia eléctrica durante un ensayo de tracción. Como resultado de su investigación, concluyen que la deformación y el esfuerzo en las muestras están relacionadas con la variación de la resistencia eléctrica del material. A su vez, Pour-Ghaz et al., 2011 y 2013, usando electrodos de cobre y radiofrecuencia, han monitoreado el agrietamiento por contracción en muestras de mortero (en forma de anillo) reforzadas con fibras metálicas, pudiendo detectar las grietas cuando su tamaño fue mayor a los 0.02 mm. En su trabajo, han concluido que existe una relación no-lineal entre el incremento de la resistencia eléctrica y el aumento del ancho de la grieta, en muestras reforzadas con fibras metálicas comerciales (Pour-Ghaz et al., 2013). Sin embargo, no se ha encontrado en la literatura estudios referentes a la utilización de residuos metálicos reciclados procedentes de la industria, para la evaluación de la monitorización del daño en morteros de cemento. Por lo tanto, este estudio tiene como principal objetivo evaluar la influencia del tipo y contenido de dos diferentes residuos metálicos en las propiedades mecánicas y de auto-monitorización del daño de morteros de cemento. Con este objetivo, nueve diferentes morteros de cemento, con la misma relación agua/cemento, pero con dos diferentes residuos metálicos (fibras y virutas de acero), y cuatro diferentes porcentajes de adición (4 a 16% s/c) han sido fabricados y evaluados a dos diferentes edades de curado (7 y 28 días).

1.2 Hipótesis

- Los residuos metálicos pueden tener influencia en las propiedades mecánicas y de auto-monitorización de los morteros cementicios.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

- Evaluar la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos en las propiedades mecánicas y de auto-monitorización de morteros cementicios.

1.3.2 Objetivos específicos

- Medir las propiedades morfológicas de los diferentes residuos metálicos usando microscopía óptica y electrónica de barrido.

- Determinar la densidad y porosidad de los morteros con y sin adición de residuos metálicos para dos diferentes edades de curado.
- Medir la resistencia a la flexión y la compresión de los morteros con y sin adición de residuos metálicos para dos diferentes edades de curado usando ensayos mecánicos.
- Caracterizar la superficie de fractura de los morteros con y sin adición de residuos metálicos usando microscopía electrónica de barrido.
- Evaluar las propiedades de monitorización de los morteros midiendo la variación de la resistencia eléctrica de las muestras durante el desarrollo de ensayos a flexión.
- Realizar un análisis comparativo entre las variables medidas.

1.4 Declaración de autor

Parte de la redacción de esta Tesis ha sido extraída de la publicación “Norambuena-Contreras J, Cartes A, Chávez M, Borinaga-Treviño R. Mechanical and self-monitoring behaviour of cement mortars reinforced with metallic waste”. To be submitted in May 2017 to Journal Material and Structures, Springer”

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

En esta investigación se han utilizado morteros de cemento hidráulico reforzados con dos diferentes tipos de residuos metálicos. De este modo, las materias primas usadas para la fabricación de los morteros fueron, cemento Portland-Puzolánico tipo IP (ASTM C595/C595M-16) con una densidad de 3.09g/cm^3 , arena fina (tamaño entre 0.16 y 2.5mm) con densidad de 2.78g/cm^3 , y un superplastificante conformado en base a polímeros sintéticos con densidad de 1.08g/cm^3 . La composición química del cemento y la arena se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de los óxidos medida mediante XRF para el cemento Portland-Puzolánico y arena fina utilizada en este estudio.

Oxide type/amount (wt%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Sum
Portland-Pozzolana Cement	25.95	14.41	5.39	2.76	40.56	2.45	1.34	2.31	0.53	95.69
Fine Sand	44.93	20.81	7.83	6.13	9.09	4.94	0.68	-	1.87	96.29

Nota: La incertidumbre asociada a las mediciones fue inferior al 1%.

Adicionalmente, se agregaron al mortero de cemento, dos tipos de residuos metálicos eléctricamente conductores y cortados mecánicamente, estos son: fibras de lana de acero (Figura 1(a)) y virutas metálicas (Figura 1(b)). Las fibras de lana de acero estaban compuestas por acero

de bajo contenido de carbono, con una densidad de 7.180g/cm^3 y resistividad eléctrica promedio de $2.23 \times 10^{-5}\Omega\text{m}$. Estas fibras tienen un diámetro promedio de 0.133mm (Figura 1(c)), con una relación de aspecto promedio de 44 y una longitud inicial en un rango de 2 a 14mm , lo que significa que tanto fibras cortas como largas fueron añadidas al mortero de cemento. Asimismo, las virutas metálicas estaban compuestas por Acero Inoxidable Ferrítico, con una densidad de 7.980g/cm^3 y resistividad eléctrica de $1.67 \times 10^{-5}\Omega\text{m}$. Estas virutas tenían un ancho promedio de 1.310mm (Figura 1(d)) y una longitud inicial en un rango de 3 a 21mm , lo que significa que tanto virutas cortas como largas fueron añadidas al mortero de cemento, con cuatro distintos tipos de geometría, ver Figura 1(b), fueron añadidas al mortero de cemento. Finalmente, el análisis elemental básico de fibras y virutas metálicas recicladas utilizadas en este estudio se muestra en la Tabla 2.

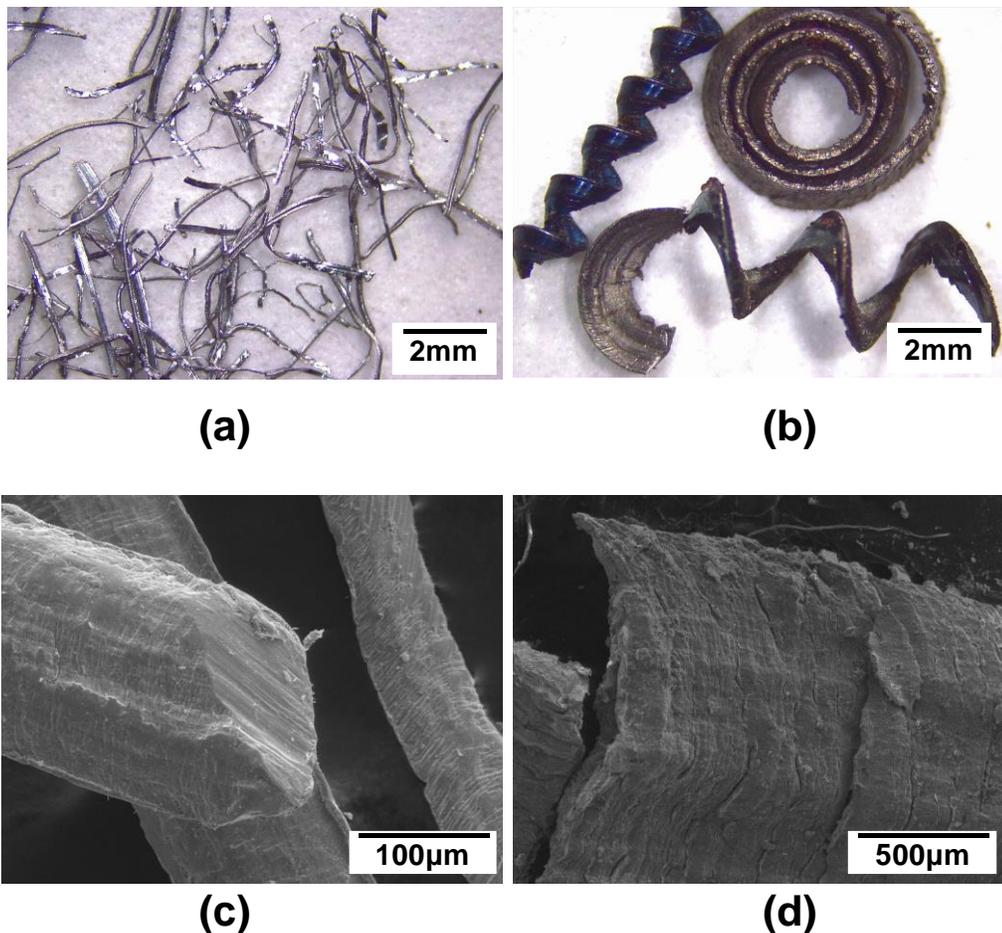


Figura 1. Imágenes ópticas (a-b) e imágenes SEM (c-d) de las fibras de lana de acero y virutas de acero.

Tabla 2. Análisis elemental medido mediante EDXS para los residuos metálicos reciclados usados en este estudio.

Element type/amount (wt%)	Metallic waste type	
	Shavings	Fibres
Fe	97.49	98.38
Mn	1.44	1.30
Si	0.51	0.18
Cr	0.21	-
C	0.30	0.12
Sum	99.95	99.98

Nota: La incertidumbre asociada a las mediciones fue inferior al 1%.

2.2 Preparación de las muestras

En este estudio se han fabricado nueve mezclas distintas de mortero de cemento, con la misma razón agua/cemento, pero con dos diferentes tipos de residuos metálicos (fibras y virutas metálicas), y cuatro diferentes porcentajes. De este modo, los morteros consistieron en cemento, agua, aditivo superplastificante y cuatro contenidos diferentes de residuos metálicos: 4%, 8%, 12% y 16% respecto al peso unitario del cemento. La Tabla 3 muestra las proporciones en peso y volumen de las materias primas utilizadas en este estudio.

Tabla 3. Proporciones en peso y volumen de las materias primas utilizadas en la fabricación de los morteros.

w/c ratio	Cement weight (g)	Sand weight (g)	Water weight (g)	Additive volume (cm ³)	Fibres and shavings amount (% by weight/cement)	Weight of fibres and shavings (g)
0.5	450	1350	225	4.2	0	0
					4	18
					8	36
					12	54
					16	72

Se ajustó una relación peso agua/cemento de 0.5 a todas las mezclas de mortero con el objetivo de obtener una consistencia normal de acuerdo a la norma EN 196-3:2005+A1:2009. Las materias primas fueron mezcladas en un mezclador planetario estándar de laboratorio. Los materiales fueron incorporados al recipiente en el siguiente orden: primero el cemento y la arena fina, segundo el agua con el aditivo y finalmente el residuo metálico, si corresponde. Para comenzar con el procedimiento de mezclado, el cemento y la arena se mezclaron en condición seca durante 60seg a baja velocidad. Al mismo tiempo, el agua y el aditivo se mezclaron manualmente en un recipiente distinto. A continuación, se añadió el agua con aditivo al mezclador de laboratorio, mezclándose lenta y rápidamente durante 60 y 60seg, respectivamente. Después de eso, la mezcla reposó durante

120seg y luego el proceso terminó con 60seg de mezcla rápida. En los casos en que se añadieron los desechos metálicos en el mortero, estos se incorporaron gradualmente mientras se mezclaba a baja velocidad con el fin de evitar la formación de grupos de fibras (clusters). Luego, la mezcla de mortero reforzado se mezcló a baja velocidad durante 120seg. Después, las mezclas de mortero con y sin residuos metálicos fueron vertidas en el interior de moldes RILEM prismáticos. Luego, las muestras fueron ligeramente vibradas durante 5seg para minimizar las burbujas de aire en su interior. Posteriormente, los moldes RILEM fueron cubiertos con láminas de plástico y permaneciendo a temperatura ambiente durante 24hrs antes de desmoldar las muestras. Después de desmoldar, las muestras de mortero se curaron en un tanque de agua con una atmosfera controlada estándar de 22 ± 5 °C y $97\pm 2\%$ de humedad, durante 7 y 28 días. Finalmente, se fabricaron un total de 216 muestras prismáticas de 40x40x160mm: 192 muestras con fibras y virutas y 24 muestras de referencia sin residuos metálicos.

2.3 Caracterización química de las materias primas

Las materias primas utilizadas para la fabricación de los morteros de cemento han sido caracterizadas químicamente por microanálisis elemental y la determinación del contenido de óxidos mediante el uso de espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDXS) y fluorescencia de rayos X (XRF). Por lo tanto, los contenidos de los elementos básicos en los residuos metálicos (fibras y virutas) se midieron mediante la caracterización EDXS usando un Microscopio Electrónico de Barrido TESCAN Vega-3 LMU con una unidad de microanálisis de dispersión de energía de rayos X. Adicionalmente, los contenidos de óxidos en el cemento y la arena se midieron usando caracterización de XRF mediante un espectrómetro de fluorescencia de rayos X ARL Advant XP equipado con detectores de flujo y dispersión.

2.4 Caracterización morfológica de los residuos metálicos

Para determinar las características morfológicas de los residuos metálicos incorporados en los morteros, se seleccionaron aleatoriamente aproximadamente 120 fibras y virutas de todos los residuos almacenados para la fabricación. La longitud y diámetro de las fibras de lana de acero, y la longitud y ancho de las virutas de acero se determinaron mediante fotografías realizadas con un microscopio óptico Leica EZ4, con una magnificación de 35x. Posteriormente calculando cada valor de longitud, diámetro o ancho usando el programa de procesamiento de imagen ImageJ® (ver Figura 1(a) y (b)). Así, las variables morfológicas de las fibras y virutas se presentan en histogramas de frecuencia con el objetivo de comparar sus distribuciones de longitud, diámetro y ancho. Además, debido a las diferentes geometrías de las virutas de acero recicladas, sus variables

morfológicas de longitud y ancho se clasificaron y midieron según la tipología que se muestra en la Figura 2. De esta manera, fue posible medir la contribución de cada tipo de viruta de acero en un histograma de frecuencia específico. Finalmente, se analizaron el aspecto superficial y la sección transversal de las fibras de lana de acero y virutas de acero a través de imágenes SEM obtenidas utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido TESCAN Vega-3 LMU.

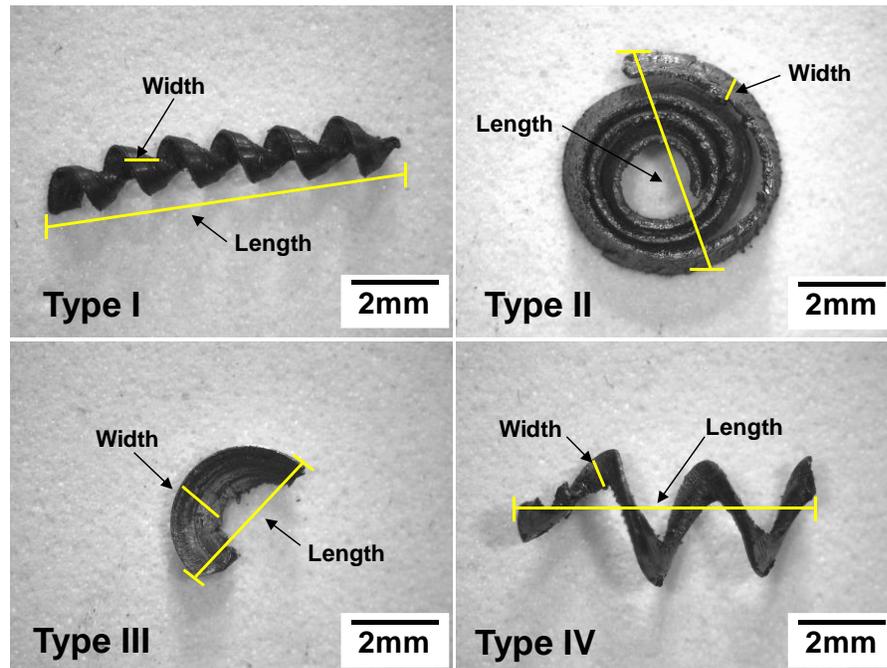


Figura 2. Tipología de las virutas de acero utilizadas: medición de la longitud y ancho.

2.5 Análisis fractográfico de la superficie de falla de los morteros usando SEM

Con el objetivo de evaluar las superficies de fractura por flexión y caracterizar la interface entre el residuo metálico y la matriz de cemento, se realizó una evaluación fractográfica a través de imágenes SEM obtenidas mediante un Microscopio Electrónico de Barrido TESCAN Vega-3 LMU sobre las superficies de falla de los morteros con residuos metálicos seleccionados.

2.6 Densidad aparente y porosidad de las muestras

Con el fin de evaluar el efecto del tipo y contenido de residuos metálicos sobre las propiedades físicas de los morteros de cemento después de 7 y 28 días, la densidad (ρ) y la porosidad accesible al agua (n) de cada muestra RILEM con y sin residuos metálicos han sido medidas y determinadas por las ecuaciones (1) y (2) según la norma ASTM C642-13. Finalmente, las densidades y porosidades representativas de cada mezcla de mortero se han determinado como el resultado del promedio de 12 muestras sin residuos metálicos y 24 muestras con residuos metálicos, para cada edad de curado.

$$\rho = \frac{m_{dry}}{m_{sat} - m_{sub}} \cdot \rho_w \quad (1)$$

$$n = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{m_{sat} - m_{sub}} \quad (2)$$

Donde m_{sat} es la masa saturada en agua de las muestras ensayadas; m_{sub} es la masa sumergida en agua de las muestras ensayadas; m_{dry} es la masa secada al horno de las muestras ensayadas y ρ_w es la densidad del agua a temperatura ambiente al momento del ensayo, como se definió en el método utilizado.

2.7 Medida de las propiedades de flexión y compresión en las muestras

Con el propósito de evaluar la influencia del tipo y cantidad de residuos metálicos sobre las propiedades mecánicas de los morteros después de 7 y 28 días, se midieron las resistencias a la flexión y a la compresión de todas las muestras prismáticas con y sin residuos metálicos mediante ensayos mecánicos. Las resistencias a la flexión y compresión para cada mezcla de mortero se evaluaron de acuerdo a las normas ASTM C348-14 y ASTM C349-14, respectivamente. La resistencia a la flexión se determinó como el promedio de 12 muestras prismáticas por cada mezcla de mortero y edad de curado. En contraste, la resistencia a la compresión se determinó como el promedio de 24 muestras cúbicas obtenidas de las muestras prismáticas ensayadas a flexión (después de la fractura por flexión, se obtienen dos piezas por cada muestra prismática) por cada mezcla de mortero y edad de curado. Finalmente, a partir de los ensayos de flexión y compresión, también se calcularon propiedades mecánicas como el módulo de flexión (E_f) y el módulo de elasticidad estático por compresión (E_c).

2.8 Medida del módulo de elasticidad dinámico usando ultrasonido

Para evaluar la influencia del tipo y cantidad de residuos metálicos sobre el módulo de elasticidad de los morteros después de 7 y 28 días, se ha medido el módulo elástico de compresión de todas las probetas prismáticas con y sin residuos metálicos mediante un ensayo de velocidad de pulsos ultrasónicos establecido en la norma ASTM C597-16. Por lo tanto, las mediciones dinámicas de las pruebas ultrasónicas se realizaron mediante la propagación de ondas de compresión (ondas P) a través de las muestras cúbicas obtenidas a partir de las muestras prismáticas ensayadas en flexión. De este modo, las mediciones ultrasónicas se realizaron antes que los ensayos de resistencia a la compresión descritos en la sección 2.7. Para desarrollar las mediciones ultrasónicas, se utilizó un

equipo de ultrasonidos modelo 58-E4800 UPV (Controls Group) con dos transductores piezoeléctricos de 54kHz (ver Figura 3). Adicionalmente se utilizó vaselina para asegurar el contacto entre los transductores y las caras de la muestra. Para realizar los ensayos cada muestra se colocó sobre un soporte de espuma acústica y se midió a través de su espesor, ver la Figura 3.



Figura 3. Medida del módulo de elasticidad dinámico de los morteros mediante ensayo por ultrasonido.

Por lo tanto, el equipo determinó el tiempo de propagación de los pulsos ultrasónicos (medido en μs) para cada muestra de ensayo, y conociendo el espesor de la muestra, se determinó la velocidad de las ondas P de cada muestra de mortero. El valor representativo del tiempo de ultrasonido en cada muestra se calculó como el promedio de 3 repeticiones. Por lo tanto, el módulo de elasticidad dinámico (E_u) de cada muestra se calculó a partir de la velocidad de las ondas P de acuerdo a la Ecuación (3)

$$E_u = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \rho V_p^2 \quad (3)$$

Donde ν y ρ son el coeficiente de Poisson y la densidad aparente (medida en g/cm^3) de las muestras ensayadas, respectivamente. En este estudio, el coeficiente de Poisson de todas las muestras de mortero con y sin residuos metálicos se consideró igual a 0.20, de acuerdo al estudio de Valentini et al., 2014. Finalmente, el módulo de elasticidad dinámico representativo, medido en MPa, se determinó como el promedio de 24 muestras cúbicas por cada mezcla de mortero y edad de curado.

2.9 Monitorización del daño por agrietamiento en las muestras con residuos metálicos

Como se ha comentado anteriormente, se pueden utilizar fibras y partículas eléctricamente conductoras para detectar y cuantificar el daño por agrietamiento en los morteros de cemento reforzados utilizando métodos de auto-monitorización no invasivos (Pour-Ghaz, 2011). En esta investigación se desarrolló un estudio experimental con el objetivo de evaluar la monitorización del daño por agrietamiento en morteros reforzados con residuos metálicos por medio de la medición de su resistencia eléctrica, ver Figura 4. Para ello, las muestras prismáticas utilizadas durante los ensayos de flexión se instrumentaron con dos electrodos de placa de acero inoxidable con dimensiones 3x2cm. Antes del ensayo de flexión, los electrodos de placa se fijaron en los extremos de las muestras utilizando una cinta adhesiva aislante y luego se conectaron a un óhmetro modelo HIOKI IR4056-20 con 5 rangos de voltaje, ver Figura 4(a). Por lo tanto, el equipo óhmetro se utilizó para cuantificar la variación de la resistencia eléctrica (medida en $M\Omega$) registrada durante el agrietamiento por flexión, ver Figura 4(b).

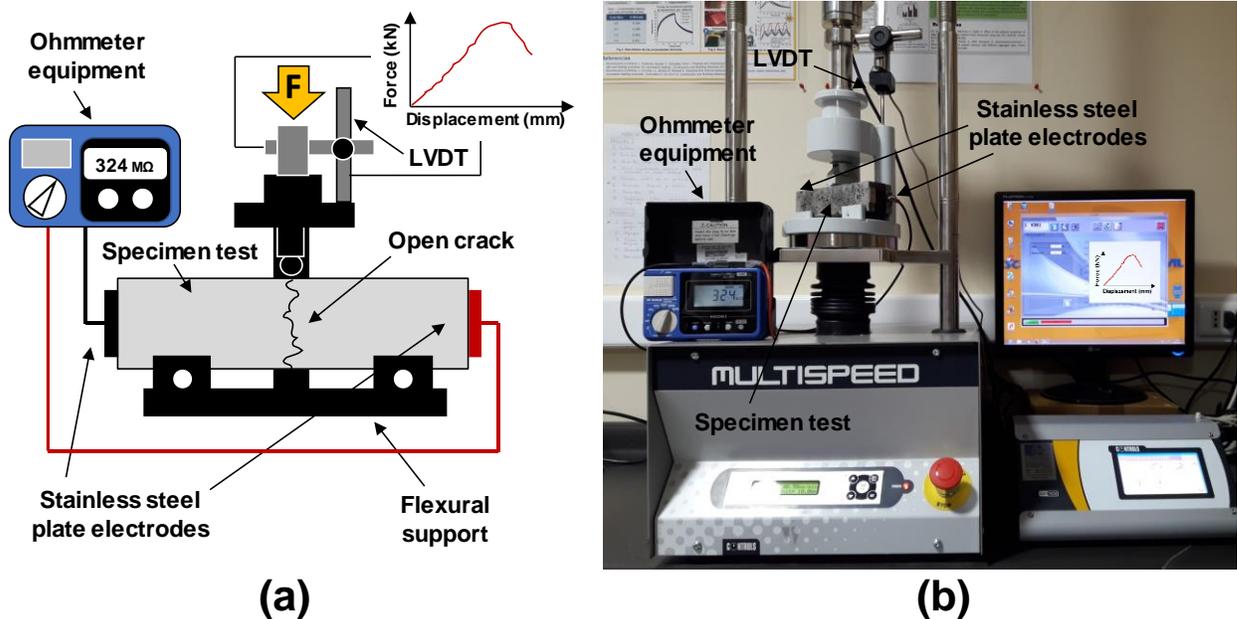


Figura 4. (a) Montaje de la monitorización del daño por agrietamiento; (b) medición del agrietamiento y variación de la resistencia eléctrica en las muestras con residuos metálicos.

Para medir la resistencia eléctrica en las muestras durante el ensayo a flexión se requirió de un voltaje variable. La resistencia eléctrica de cada muestra de mortero reforzado con residuos metálicos se correlacionó con el ancho de la fisura medido mediante el uso de un sensor LVDT situado en la muestra y conectado a un PC. Finalmente, considerando el pequeño desplazamiento presentado por las muestras (menores a 1.5mm), en este estudio, el desplazamiento vertical registrado por el LVDT se consideró igual a la deformación y el ancho de la grieta presentado en

las muestras. Además, la monitorización del daño por agrietamiento se determinó en un total de 12 muestras prismáticas por cada mezcla de mortero y edad de curado.

2.10 Variables experimentales evaluadas en este estudio

Finalmente, en la Tabla 4, se han representado las abreviaturas de las variable incluidas en este estudio. Se han analizado un total de 15 variables. Cuatro referentes a las características de los residuos metálicos: diámetro y longitud de las fibras de lana de acero, y longitud y ancho de las virutas de acero. Cuatro relacionadas con las propiedades físicas de los morteros: porcentaje de residuos metálicos, edad de curado, densidad aparente y porosidad. Cinco relacionadas a las propiedades mecánicas de los morteros: resistencia a la flexión, módulo de flexión, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad estático por compresión y módulo de elasticidad dinámico por ultrasonidos. Y dos variables referentes a las propiedades de monitorización de los morteros: resistencia eléctrica y ancho de grieta en los morteros.

Tabla 4. Variables incluidas en el estudio experimental.

Classification	Name	Abbreviation	Unit
1. Characteristics of the recycled metallic waste	Diameter of fibres	DF	mm
	Length of fibres	LF	mm
	Width of shavings	WS	mm
	Length of shavings	LS	mm
2. Physical properties of the mortars	Percentages of waste	PW	%
	Curing age	CA	days
	Bulk density	BD	g/cm^3
	Porosity	n	%
3. Mechanical properties of the mortars	Flexural strength	σ_f	MPa
	Flexural modulus	E_f	MPa
	Compressive strength	σ_c	MPa
	Static elastic modulus	E_c	MPa
	Dynamic elastic modulus	E_u	MPa
4. Monitoring properties of the mortars	Electrical resistance	ER	Ω
	Crack width	CW	mm

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de la morfología de los residuos metálicos cortados mecánicamente

Con el fin de asegurar una buena distribución e incorporación de los residuos metálicos dentro de las mezclas de cemento, las fibras y virutas deben tener unas propiedades morfológicas óptimas. Con esto en mente, las fibras de lana de acero y virutas de acero fueron cortadas y tamizadas mecánicamente para facilitar el proceso de mezcla y compactación de las materias primas,

obteniendo así una mejora en su trabajabilidad y distribución dentro de la matriz de mortero. Con el objetivo de demostrar que las propiedades morfológicas de las fibras y virutas cortadas mecánicamente siguen una ley de probabilidad, se ha desarrollado un análisis de probabilidad de todos los resultados morfológicos promedio, como son: longitud y diámetro de las fibras de lana de acero, y longitud y ancho de las virutas de acero. De este modo, todas las fibras y virutas independiente de sus propiedades morfológicas originales, han sido representadas como una función de probabilidad tipo Weibull, ver Figura 5 (a) y Figura 5(b), respectivamente.

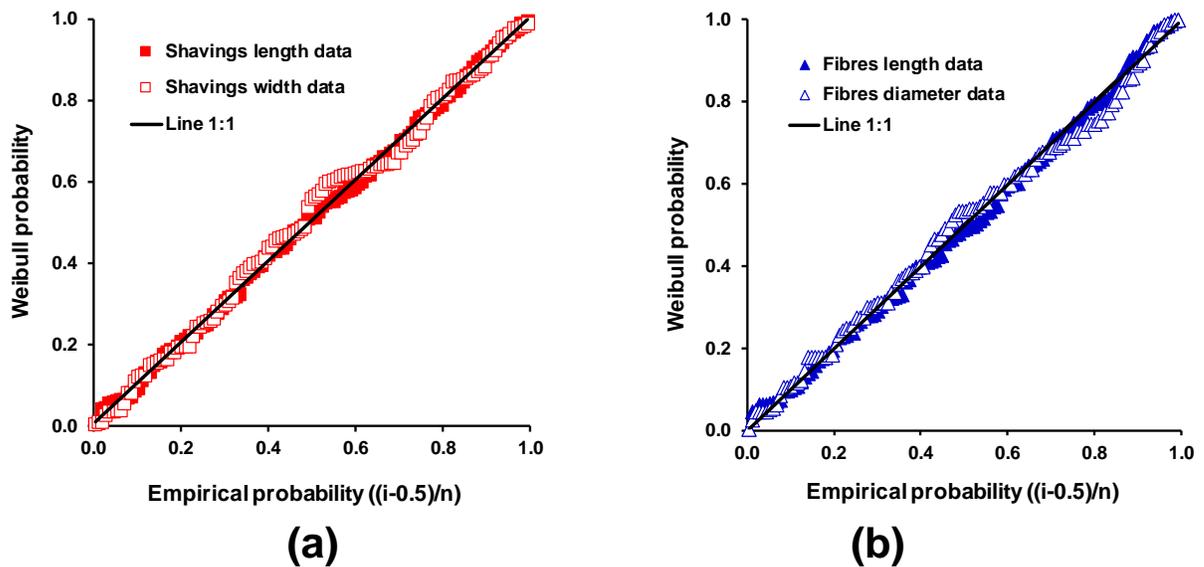


Figura 5. Gráfico de probabilidad-probabilidad tipo Weibull de la (a) longitud y ancho de las virutas metálicas, y (b) longitud y diámetro de las fibras metálicas.

A partir de estas figuras, los resultados se pueden considerar un buen ajuste debido al hecho de que todas las variables morfológicas, independientemente del tipo de residuo metálico original se pueden alinear en una recta con pendiente 1:1. Este resultado es similar a los publicados en estudios previos sobre la caracterización morfológica de fibras metálicas recicladas (Norambuena-Contreras et al., 2015) y partículas de polietileno trituradas (Norambuena-Contreras et al., 2017b) utilizadas en materiales compuestos. Adicionalmente, la función de distribución de probabilidad tipo Weibull se ha empleado en este análisis como una función de daño del material (Norambuena-Contreras et al., 2016), teniendo en cuenta que el corte de las fibras y virutas se produce debido a los diversos cortes pequeños que ocurren durante cada proceso industrial específico, como el corte longitudinal para las fibras y torneado para virutas. Por otra parte, con el objetivo de conocer la probabilidad de ocurrencia de las variables morfológicas estudiadas, se han creado histogramas de frecuencia para todos los datos morfológicos medidos mediante un microscopio óptico, ver Figura 6 y Figura 7. Basándose en estos histogramas, se demostró que las virutas de acero (longitud promedio

7.181mm) son en promedio más largas que las fibras de lana de acero (longitud promedio 5.833mm), ver la Figura 6(a) y Figura 7(a), respectivamente. Asimismo, se demostró que el ancho de las virutas metálicas es 10 veces mayor que el diámetro de las fibras, ver Figura 6(b) y Figura 7(b). Sin embargo, este resultado puede ser influenciado por la morfología de las virutas de acero usadas, ver Figura 1(b). En este estudio, se identificaron cuatro diferentes tipos de virutas de acero, con diferentes longitudes y anchos, ver Figura 2. La Tabla 5 muestra el porcentaje de cada tipo de virutas sobre la cantidad total de virutas mostradas en la Figura 6, además de su longitud y ancho promedio. En esta Tabla se observa que la mayor cantidad de virutas son del Tipo III (47%), seguidas por las del Tipo IV, V y II, con cantidades de 24%, 22% y 7%, respectivamente. Además, las virutas más largas son del Tipo IV (longitud promedio 9.38mm) y Tipo I (longitud promedio 8.43mm), seguidos por las virutas de Tipos II y III, con longitudes promedios de 5.78 y 5.67mm, respectivamente.

Tabla 5. Longitud y ancho promedio de las virutas de acero clasificadas por tipología.

Type of steel shavings according with Figura 2	Proportion of shavings on total	Average length (mm)	Average width (mm)
I	22%	8.43	1.00
II	7%	5.78	0.99
III	47%	5.67	1.83
IV	24%	9.38	0.68

Por otra parte, las virutas que presentaron un mayor ancho fueron las del Tipo III, con un valor promedio de 1.83mm. Estos resultados son consistentes en comparación con la Figura 6, lo que demuestra que independiente de la cantidad de virutas añadidas a la mezcla, existe un 88% de probabilidad de que las virutas sean más largas, entre 6 y 12mm (ver la Figura 6(a)), con un 71% de probabilidad de que el ancho oscile en un rango de 0.5 y 1.5mm, y un 20% de probabilidad que ese rango oscile entre 2 y 2.5mm (ver Figura 6(b)). Por otro lado, a partir de la Figura 7, se puede demostrar que independiente de la cantidad de fibras añadidas a la mezcla, hay un 85% de probabilidad de que las fibras sean largas, entre 4 y 8mm. Mientras que la probabilidad de añadir fibras más cortas (menores a 4mm) o largas (más de 8 mm) es mucho menor, siendo 1 y 14%, respectivamente. Como resultado, la longitud de las fibras fluctuó entre 2 y 14mm, siendo la longitud promedio de aproximadamente 5.8mm (ver Figura 7(a)). Este valor puede ser considerado como una fibra de largo medio de acuerdo a los resultados publicados por Norambuena-Contreras et al., 2015. Finalmente, el diámetro de las fibras calculado a partir de la medición de 120 fibras

individuales usando un microscopio óptico fue en promedio de 0.133mm (ver Figura 7(b)). Este valor puede considerarse como una fibra de tipo gruesa de acuerdo a García et al. (2013). En resumen, se puede concluir que se añadieron fibras y virutas largas y gruesas a la mezcla de mortero.

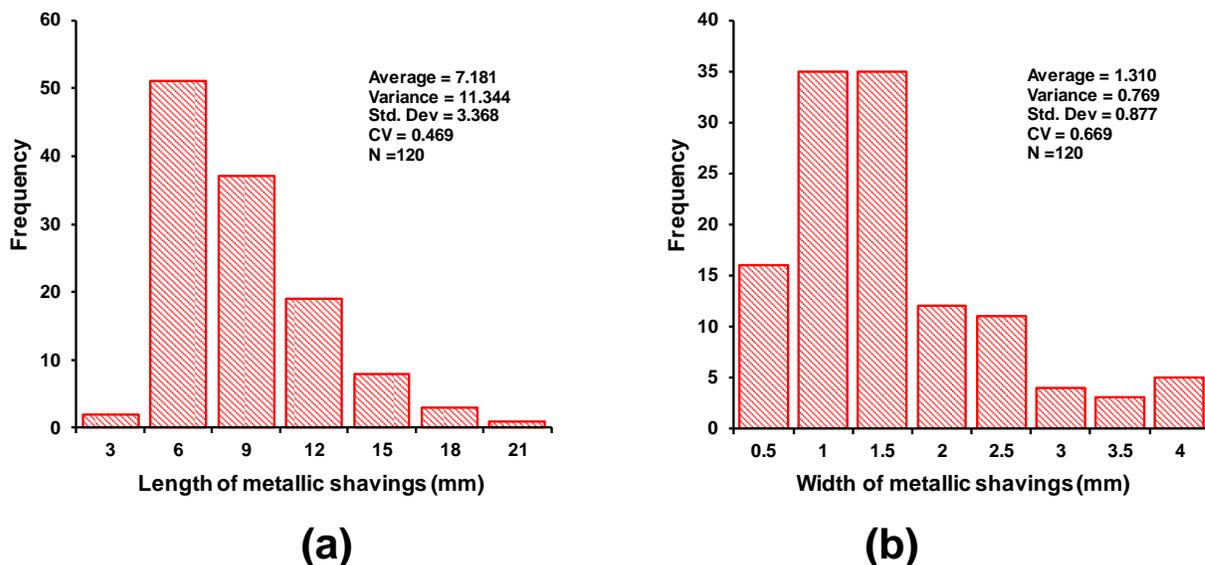


Figura 6. Histograma de frecuencias basado en la función de probabilidad tipo Weibull para la (a) longitud y (b) ancho de las virutas.

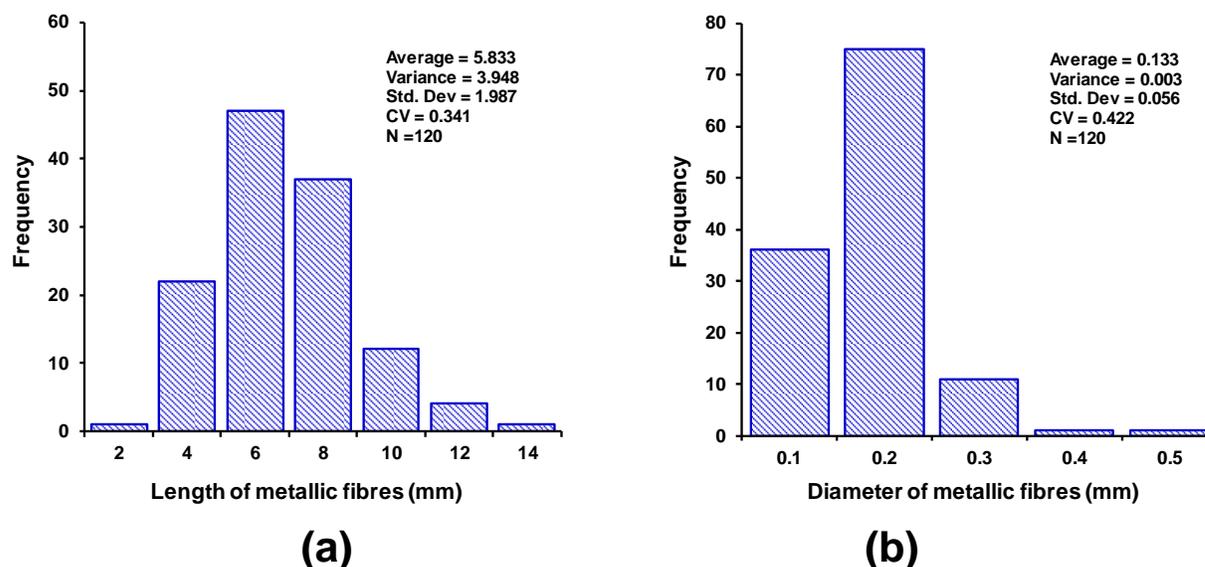


Figura 7. Histograma de frecuencia basado en la función de probabilidad tipo Weibull para la (a) longitud, y (b) diámetro de las fibras.

3.2 Influencia de los residuos metálicos sobre las propiedades físicas de las muestras

En la Figura 8 se muestran los resultados promedios de las densidades aparentes (Figura 8(a)) y porosidades (Figura 8(b)) de las muestras de mortero con diferentes tipos y contenidos de residuos

metálicos evaluados para dos distintas edades de curado. Las barras de error de estas Figuras corresponden a una desviación estándar. A partir de la Figura 8(a) se puede observar que independiente del tipo de residuo metálico y edad de curado, la densidad aparente promedio disminuyó proporcionalmente con el aumento de los residuos metálicos. De esta forma, el mayor valor promedio de densidad corresponde a las muestras de referencia, 1.736 y 1.705g/cm³ para edades de 7 y 28 días, respectivamente. Mientras tanto, para los morteros con residuos metálicos, los menores valores promedios de densidad corresponden a los morteros con un 16% de residuos metálicos, cuyos valores para 7 y 28 días de curado son: 1.644 y 1.666g/cm³ para morteros con virutas, y 1.704 y 1.683g/cm³ para morteros con fibras. No obstante, las muestras con virutas presentaron una mayor reducción de la densidad aparente (mayor pendiente) respecto a las muestras con fibras (menor pendiente). Esta diferencia se debe a la morfología de los residuos metálicos utilizados en este estudio. De este modo, la morfología irregular de las virutas provocó un mayor incremento del volumen total en el mortero, ver sección 3.1.

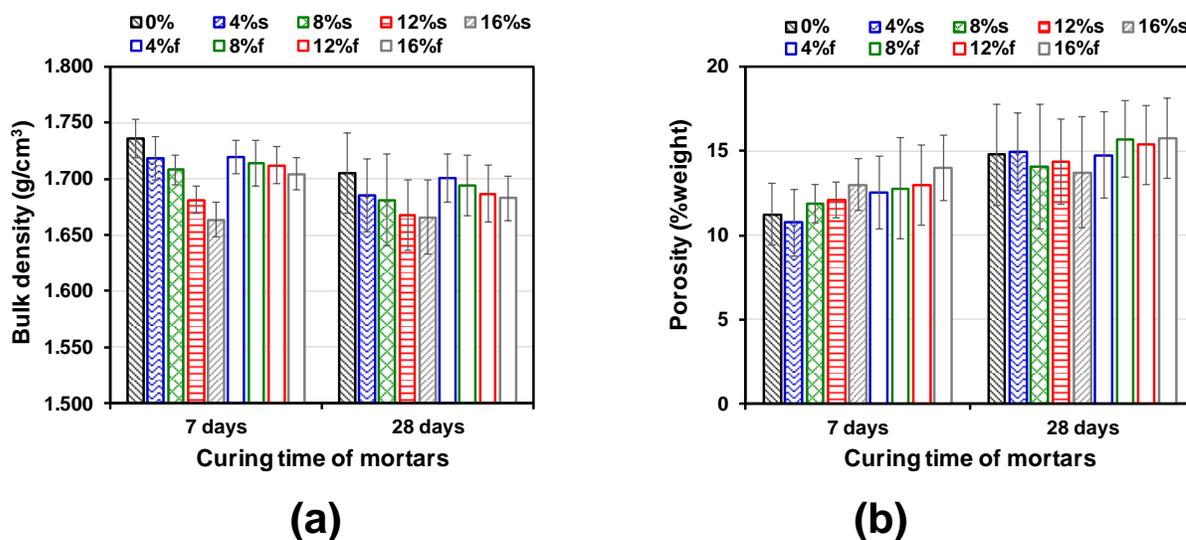


Figura 8. Relación entre la (a) densidad aparente y la (b) porosidad de las muestras para diferentes contenidos de residuos metálicos y tiempos de curado.

Adicionalmente, en este estudio se comprobó que la densidad aparente de los morteros se vio afectada producto de la porosidad, ver Figura 9. En esta Figura se puede observar que independiente de la cantidad de residuos metálicos y la edad de curado, la relación entre la porosidad y la densidad aparente de las muestras es lineal. Así, se pudo observar que la densidad se redujo proporcionalmente con el incremento de la porosidad, y que en general para un mismo valor de porosidad las muestras con fibras presentaron una mayor densidad. Por otra parte, al comparar los valores promedios de densidad para ambas edades de curado, ver Figura 8(a), se pudo observar que

las muestras con fibras presentaron valores de densidad promedio mayores que las muestras con virutas. Del mismo modo, los resultados indican que la densidad aparente promedio se redujo con el tiempo de curado. Sin embargo, observando las barras de error de los resultados de densidad, esta conclusión puede considerarse poco significativa considerando la variabilidad de los resultados presentados. Por lo tanto, en este estudio no se pudo concluir que la edad de curado tiene una influencia significativa sobre la densidad de las muestras. Como conclusión, la variación de la densidad aparente para los morteros con residuos metálicos, se atribuyó principalmente a la variación del volumen total de cada muestra más que a la variación de su masa seca, comparado con una muestra sin residuos.

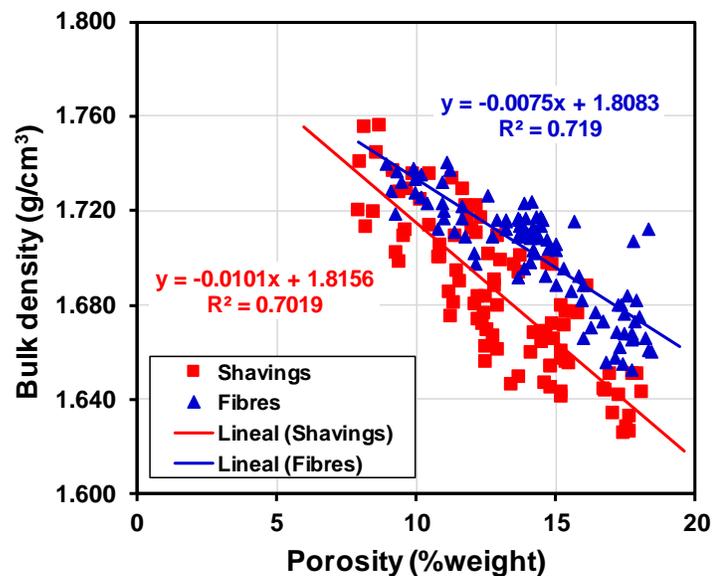


Figura 9. Resultados de la densidad aparente en función de la porosidad medidas en las muestras de mortero.

Por otro lado, en la Figura 8(b) se observa que en general, independiente de la edad de curado y del tipo de residuo metálico, las muestras con un mayor porcentaje de residuos metálicos presentan una mayor porosidad promedio. En general, durante las mediciones, se pudo observar que los menores valores de porosidad se registraron en los morteros de referencia (sin residuos metálicos). Esto ocurrió debido a que, en las muestras de mortero de referencia, la superficie específica total es menor que en las muestras con residuos metálicos. Asimismo, comparando los valores promedios de porosidad en ambas edades de curado, se observó que las muestras con fibras presentaron mayores valores de porosidad que las muestras con virutas. Este resultado se debe a la formación de grupos de residuos metálicos (clusters) en las muestras con fibras, debido a que las fibras tienen una mayor relación de aspecto y son más flexibles, ver Figura 1. Por el contrario, las

virutas metálicas al ser más rígidas y frágiles (pudiendo ser trituradas durante la fabricación de la mezcla) son menos propensas a la formación de grupos en el interior del mortero. Esta diferencia entre las virutas y las fibras se produce debido a sus diferentes aceros constituyentes. Por una parte, las fibras son más flexibles debido al bajo contenido de Carbono en su composición, en cambio las virutas son más rígidas debido a la presencia de Cromo, ver Tabla 2. Igualmente, en este estudio se pudo observar que la porosidad promedio aumentó con la edad de curado. Sin embargo, analizando las barras de error de los resultados de porosidad, esta conclusión puede considerarse poco significativa teniendo en cuenta la variabilidad de los resultados presentados. Por lo tanto, en este estudio, no se puede concluir que la edad de curado tiene una influencia significativa sobre la porosidad de las muestras. En resumen, en este estudio se observó que la densidad aparente disminuyó proporcionalmente con la incorporación de residuos metálicos y que las muestras con virutas presentaron una mayor reducción de la densidad aparente, debido al aumento del volumen total producido por la morfología irregular de las virutas. Además, se observó que la porosidad aumentó proporcionalmente con el contenido de residuos metálicos y que las muestras con fibras presentaron mayores valores de porosidad, debido a la formación de grupos de fibras (clusters). Por otra parte, se determinó que la relación entre la porosidad y la densidad es lineal, donde la densidad disminuye proporcionalmente con el aumento de la porosidad. Finalmente, en este estudio se observó que la edad de curado no presentó una influencia significativa sobre la densidad y porosidad de las muestras.

3.3 Influencia de los residuos metálicos sobre las propiedades mecánicas de los morteros

En este estudio con el objetivo de medir la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos sobre las propiedades mecánicas de los morteros, diferentes muestras con y sin adición de residuos metálicos han sido sometidas a ensayos de flexión y compresión, ver resultados en la Figura 10. De este modo, la Figura 10(a) muestra los resultados promedios de la resistencia a la flexión y la Figura 10(b) muestra los resultados promedios de la resistencia a la compresión para las muestras de mortero con diferentes tipos y contenidos de residuos metálicos, evaluadas para dos distintas edades de curado. Las barras de error de la Figura 10 corresponden a una desviación estándar. En la Figura 10 se observa que en general la resistencia mecánica del mortero aumentó proporcionalmente con el contenido de residuos metálicos y que las muestras con virutas presentaron valores promedios mayores que las muestras con fibras, este comportamiento se presentó tanto para la resistencia a la flexión como a la compresión. Así, al incorporar un 16% de residuos metálicos, las muestras con virutas alcanzaron valores promedios de resistencia a la

flexión de 7.6 y 8.5 MPa, y valores promedios de resistencia a la compresión de 33.1 y 36.0MPa, para edades de 7 y 28 días, respectivamente. Mientras que las muestras con un 16% de fibras alcanzaron valores promedios de resistencia a la flexión de 7.3 y 8.1MPa, y valores promedios de resistencia a la compresión de 32.6 y 34.4 MPa, para edades de 7 y 28 días, respectivamente.

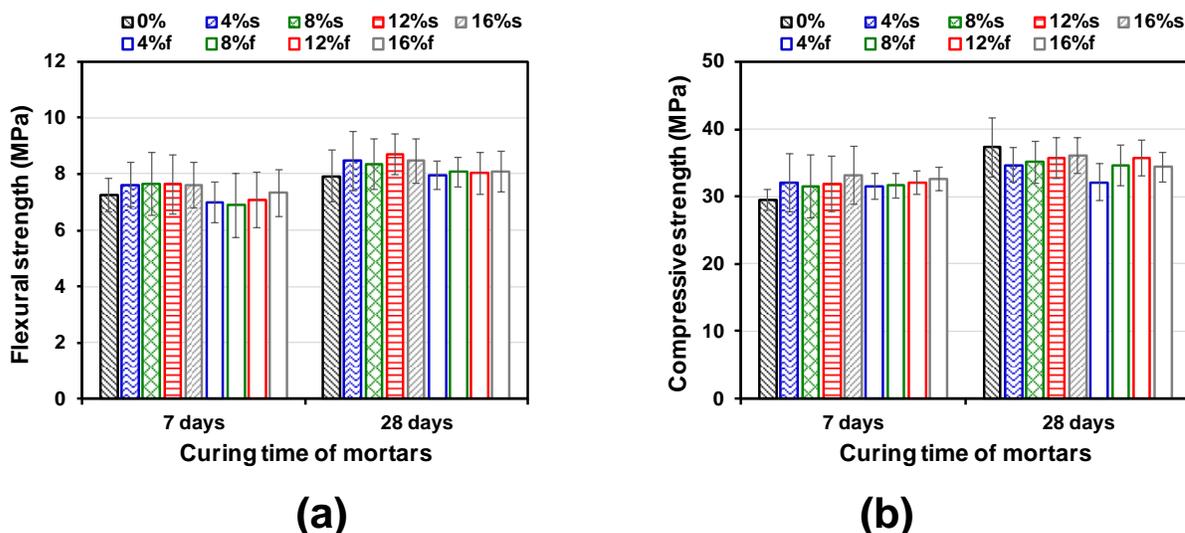


Figura 10. Resultados promedio de la resistencia a la (a) flexión y (b) compresión para diferentes tiempos de curado y contenidos de residuos metálicos.

Con el objetivo de comprender de mejor manera estos resultados, en la Figura 11 se ha representado la idealización del modo de falla por agrietamiento presentado en los ensayos de flexión (Figura 11(a)) y compresión (Figura 11(b)) para muestras con virutas ((Figura 11(c)) y fibras (Figura 11(d)). En las Figura 11(c) y Figura 11(d) se muestra que las resistencias a la flexión y a la compresión podrían haber mejorado debido a la correcta orientación de los residuos metálicos. Esto pudo haber ocurrido debido a la morfología de los residuos metálicos (ver Figura 1), los cuales contribuyen de mejor manera cuando tienen la posibilidad de trabajar a tracción. De este modo, los residuos metálicos al estar alienados correctamente en el interior de la matriz impiden la propagación de las grietas generadas producto de los esfuerzos de tracción en el mortero. Por otra parte, las muestras con virutas presentaron valores promedios mayores de resistencia a la flexión y compresión (ver Figura 10) debido a su aspecto superficial rugoso (ver Figura 12(a)). Este aspecto superficial rugoso permitió que una mayor cantidad de pasta de cemento se adhiriera a las virutas, ver Figura 12(a). Esta mejora en la unión entre las virutas y la matriz de mortero, aumenta la probabilidad de que las virutas fallen por corte (ver Figura 11(c)) antes de que se produzca el deslizamiento en uno de los extremos de la viruta. Por el contrario, debido al aspecto superficial liso de las fibras (ver Figura 12(b)), estas pueden fallar por deslizamiento antes de alcanzar su

capacidad máxima al corte (ver Figura 11(d)). En la Figura 11(d), se muestra que las fibras con una mayor relación de aspecto pueden fallar por deslizamiento, al ser más flexibles, en cambio las fibras con una menor relación de aspecto pueden fallar por corte, al ser más rígidas y compactas.

Symbol statement

- σ_i : Tensile strength
(st: Specimen test; ss: Steel shaving; swf: Steel wool fibre)
- τ_i : Shear strength
(ss: Steel shaving; swf: Steel wool fibre)
- T_{i-j} : Contact surface adherence load
(ss: Steel shavings, swf: Steel wool fibre, mm: Matrix mortar)

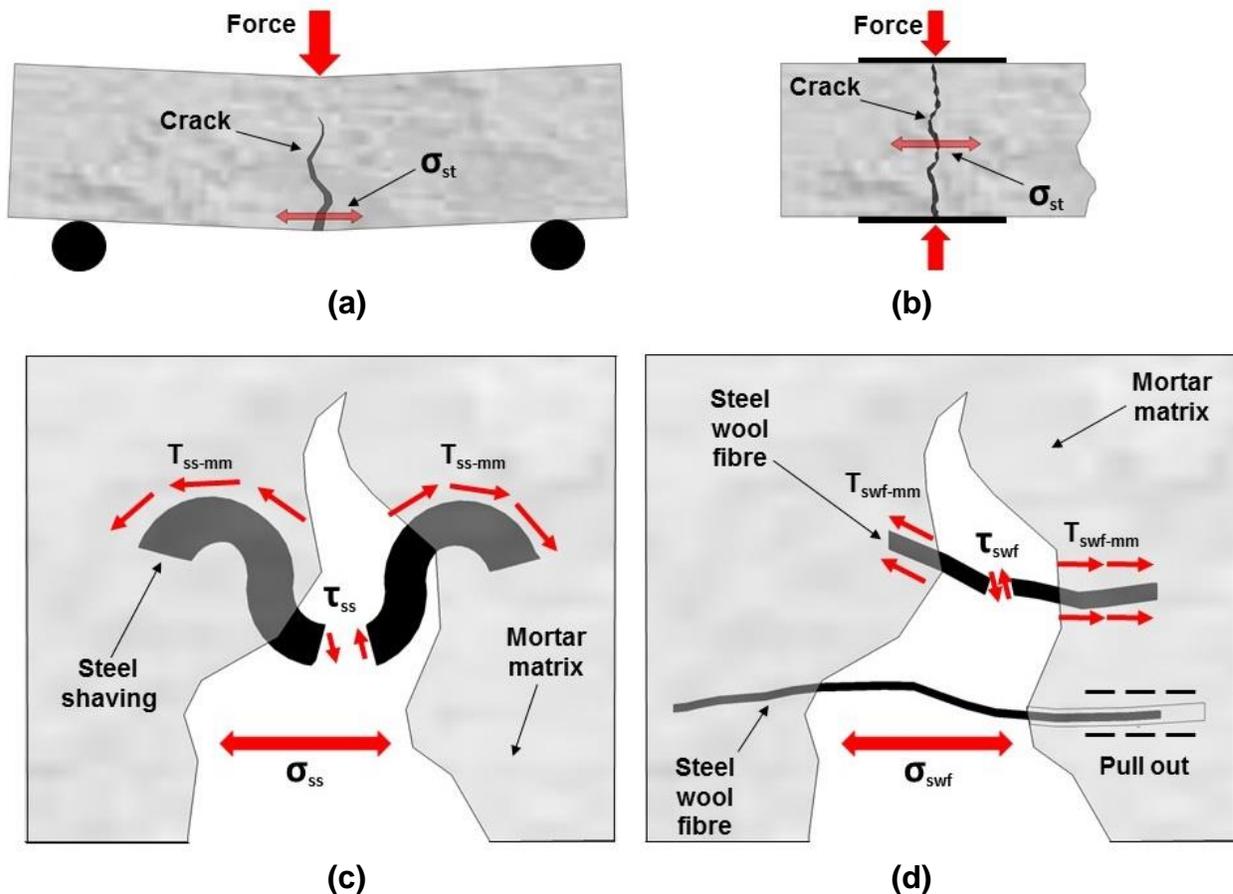


Figura 11. Idealización del agrietamiento producido durante los ensayos de (a) flexión y (b) compresión en muestras de morteros con (c) virutas y (d) fibras.

Asimismo, al comparar los valores promedios de resistencia a la flexión (Figura 10(a)) y compresión (Figura 10(b)) para las edades de 7 y 28 días, no se observó un aumento considerable con la edad de curado, lo que pudo deberse a la incorporación del aditivo superplastificante, el cual homogeneizó el comportamiento entre las dos edades.



Figura 12. Imágenes SEM de la superficie de fractura en muestras con (a) virutas y (b) fibras metálicas.

Del mismo modo analizando las barras de error en la Figura 10, se observa que el tipo y cantidad de residuo metálico, no tienen una clara influencia en el incremento de la resistencia a la flexión y compresión de los morteros. Para comprobar esta hipótesis, en la Figura 13 se muestran los gráficos de probabilidad-probabilidad de todos los valores de fuerza máxima en flexión (Figura 13(a)) y compresión (Figura 13(b)) para todas las muestras ensayadas, graficados usando una distribución de probabilidad de tipo Normal. En estas Figuras, se observa que todos los resultados pueden ser alineados a una recta 1:1, lo que comprueba que el tipo, cantidad de residuos metálicos y edad de curado, no presentaron un efecto significativo sobre la resistencia a la flexión y compresión de los morteros ensayados.

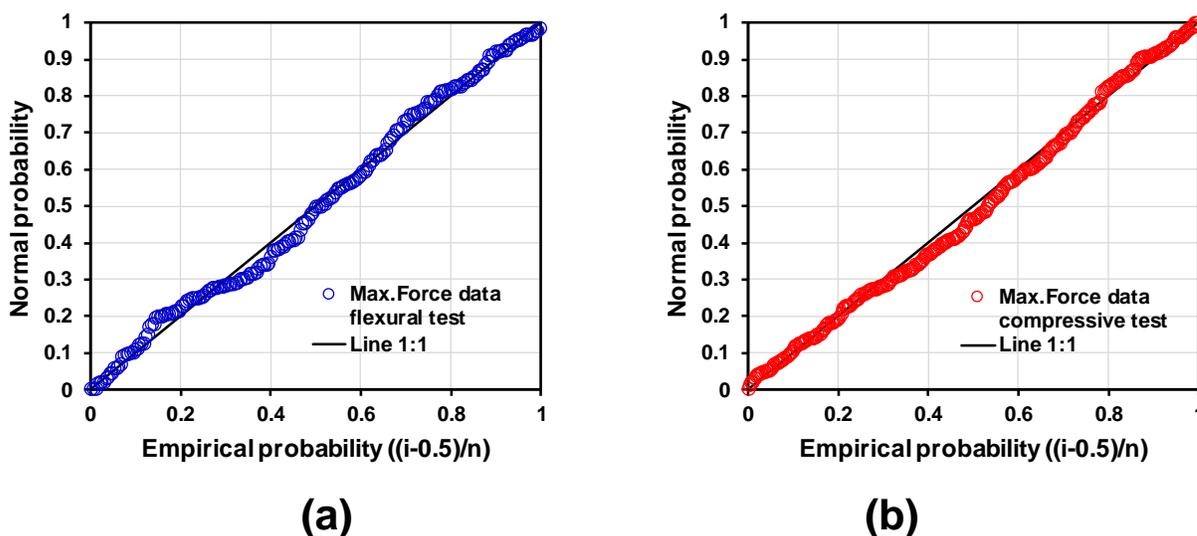


Figura 13. Gráficos probabilidad-probabilidad para los valores de fuerza máxima a la (a) flexión y (b) compresión.

Por otra parte, continuando con el análisis de las propiedades mecánicas, en la Figura 14 se muestran los valores promedio de los módulos elásticos estáticos por compresión y dinámicos por ultrasonidos para muestras con diferentes contenidos de virutas (Figura 14(a)) y fibras (Figura 14(b)). Las barras de error en estas Figuras corresponden a una desviación estándar. En la Figura 14 se observa que el módulo de elasticidad estático por compresión aumentó proporcionalmente con el contenido de residuos metálicos. Por el contrario, el módulo de elasticidad dinámico por ultrasonidos disminuyó proporcionalmente con el incremento de residuos metálicos. Además, al comparar los valores promedio entre los módulos de elasticidad medidos por compresión y ultrasonidos, se observa que el módulo elástico por ultrasonidos es mayor que el módulo elástico por compresión. Este resultado se corresponde a los obtenidos anteriormente por Norambuena et al., 2010 en muestras de mezcla asfáltica y Valentini et al., 2014 en muestras de mortero de cemento. Esto se debe a que los módulos de elasticidad estáticos por compresión comúnmente son menores debido a la naturaleza no lineal de la curva esfuerzo-deformación obtenida en el ensayo de compresión (ensayo destructivo). Por el contrario, el módulo de elasticidad por ultrasonidos se obtuvo mediante de un método dinámico no destructivo que utiliza la propagación de ondas P a través de la muestra.

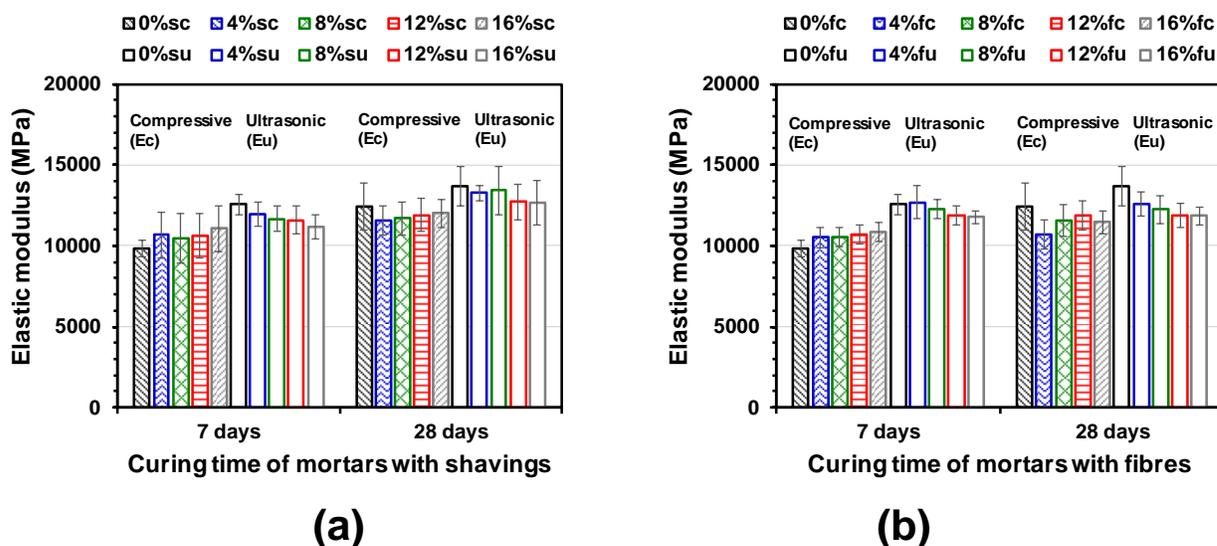


Figura 14. Resultados promedio de los módulos elásticos por compresión y ultrasonido para muestras de mortero con (a) virutas y (b) fibras.

De este modo, a los 7 días de curado, para un 4% de residuos metálicos los valores promedios del módulo elástico por compresión fueron un 10.95% y 17.11% más bajo que el modulo elástico por ultrasonido, en muestras con virutas y fibras, respectivamente. En cambio, a los 28 días de curado, para las muestras con un 16% de residuos metálicos, los valores promedios del módulo elástico por

compresión fueron un 5.24% y 3.19% más bajo que el módulo elástico por ultrasonido, en muestras con virutas y fibras, respectivamente. Por lo tanto, se concluye que a medida que aumenta el porcentaje de residuos metálicos la diferencia entre los módulos elásticos promedios fue menor. Adicionalmente, la Figura 15 muestra, todos los resultados de los módulos elásticos por compresión y ultrasonidos de manera adimensionalizada e independientes del contenido de residuos metálicos y la edad de curado. Aunque diferentes autores han comprobado una relación física entre ambos módulos elásticos (Valentini et al., 2014), en esta investigación no se observó una relación que permita determinar el módulo de elasticidad estático por compresión conocido módulo de elasticidad dinámico por ultrasonidos, ver Figura 15. Este comportamiento se debió a la gran aleatoriedad que puede existir en la distribución de los residuos metálicos en las distintas muestras. De este modo estos errores asociados a la distribución y aleatoriedad de los residuos metálicos en el interior del mortero, pueden ser interpretados como la dispersión existente en la Figura 15.

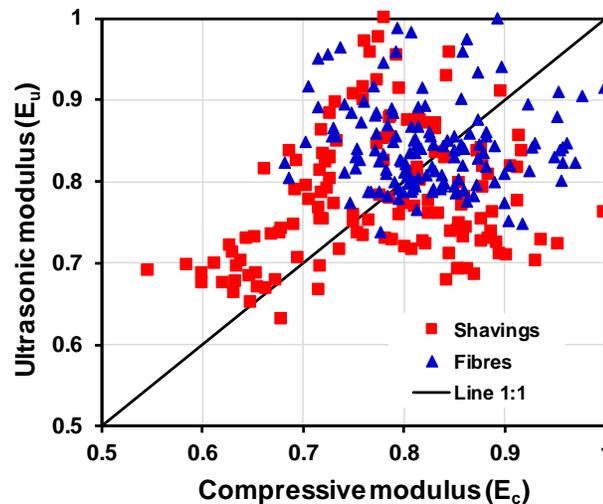


Figura 15. Relación entre los módulos elásticos por compresión y ultrasonido, para las distintas muestras de mortero con residuos metálicos.

Con el objetivo de evaluar la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos sobre los módulos de elasticidad por compresión y ultrasonido, en este estudio se ha determinado un Ratio definido como el cociente entre el módulo elástico para una muestra con residuos metálicos ($E_i - with RMW$) y el valor promedio del módulo elástico para una muestra sin residuos metálicos ($E_i - without RMW$), evaluados para una misma edad de curado:

$$Ratio = \frac{E_i - with RMW \text{ (MPa)}}{E_i - without RMW \text{ (MPa)}} \quad (4)$$

Donde, E_i corresponde al módulo de elasticidad estático por compresión E_c o el módulo de elasticidad dinámico por ultrasonidos, E_u . De este modo, los Ratios de los valores promedios para ambos módulos de elasticidad, considerando los diferentes tipos, contenidos de residuo metálico y edades de curado, se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Ratios de los valores promedios de los módulos elásticos.

Metallic wasted content	Ratio E_c				Ratio E_u			
	7 days		28 days		7 days		28 days	
	Shavings	Fibres	Shavings	Fibres	Shavings	Fibres	Shavings	Fibres
4%	1.083	1.068	0.930	0.861	0.953	1.010	0.971	0.920
8%	1.064	1.071	0.941	0.928	0.928	0.975	0.981	0.894
12%	1.077	1.085	0.958	0.957	0.923	0.948	0.930	0.869
16%	1.122	1.105	0.965	0.922	0.889	0.937	0.926	0.865

En la Tabla 6, se observa que la incorporación de residuos metálicos influye más en el módulo elástico por compresión que en el módulo elástico por ultrasonidos. En particular, la mayor influencia se obtuvo en el módulo elástico por compresión a los 7 días de curados, alcanzando valores de Ratio de 1.122 y 1.105 en muestras con un 16% de virutas y fibras, respectivamente. Además, En la Tabla se observa que el Ratio para el módulo elástico por ultrasonido disminuyó a medida que aumentó el contenido de residuos metálicos. Esto se debe a que los pulsos ultrasónicos son susceptibles a la porosidad de las muestras. Así, una mayor porosidad en las muestras (ver Figura 8(b)) implicara pulsos ultrasónicos más altos y por lo tanto una menor velocidad de propagación. Este resultado también ha sido observado por otros estudios (Norambuena-Contreras et al., 2017a). Finalmente, analizando los valores de los Ratios para los módulos de elasticidad por compresión y ultrasonido mostrados en la Tabla 6, se observa que todos los valores son cercanos a 1. Este resultado indica que el tipo de residuo, cantidad de residuo, y edad de curado no muestran una influencia notoria en el incremento del módulo de elasticidad respecto de una muestra de referencia sin residuos metálicos. Para comprobar esta hipótesis, en la Figura 16 se muestran los gráficos probabilidad-probabilidad de los Ratios para todas las muestras ensayadas, graficados usando una distribución de probabilidad tipo Weibull. Estos valores han sido graficados independiente de la cantidad de residuo y edad de curado. En esta Figura, se observa que todos los resultados pueden ser alineados a una recta 1:1, lo que indica que el tipo, cantidad de residuos metálicos y edad de curado, no presentan un efecto significativo sobre el módulo elástico de los morteros medidos bajos dos diferentes metodologías de ensayo: destructivo (E_c) y no-destructivo (E_u). En este estudio, la función de probabilidad tipo Weibull ha sido usada considerando que los módulos de elasticidad estático y dinámico de los morteros pueden ser modelados como un proceso

mecánico, teniendo en cuenta que el daño por compresión se origina debido a las múltiples grietas que se producen durante el ciclo mecánico de carga (Norambuena-Contreras, 2016).

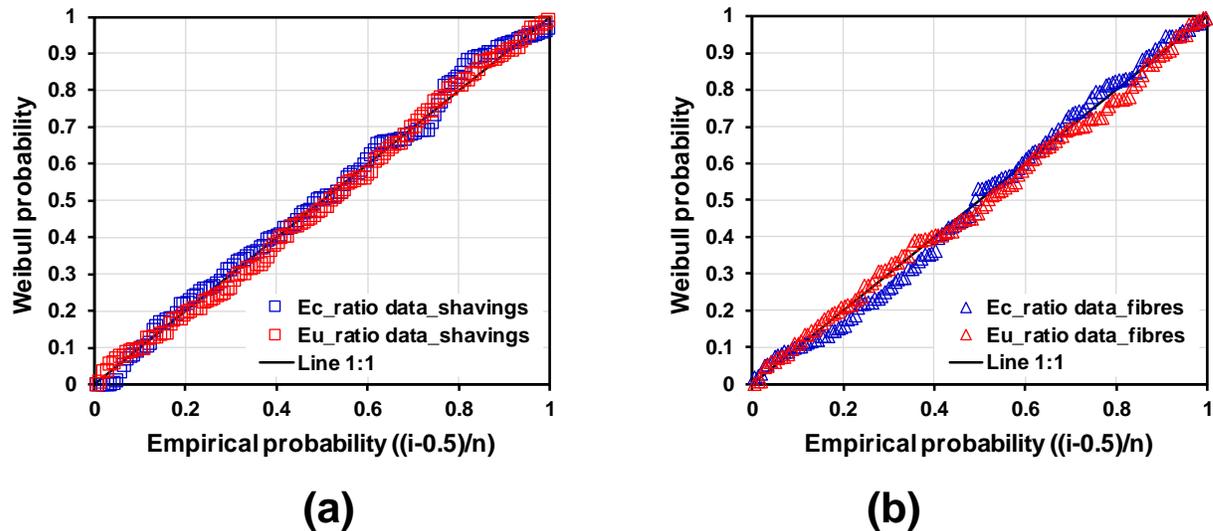


Figura 16. Gráficos probabilidad-probabilidad de todos los Ratios para las muestras de morteros con (a) virutas y (b) fibras.

En resumen, en este estudio se comprobó que el tipo, cantidad de residuos metálicos y edad de curado, no presentaron un efecto significativo sobre las resistencias mecánicas de flexión y compresión de los morteros ensayados. Del mismo modo, estas variables no presentaron una influencia notoria en el incremento de los módulos de elasticidad por compresión y ultrasonidos, respecto de una muestra de referencia sin residuos metálicos. Además, debido a la gran aleatoriedad que existen en la distribución de los residuos metálicos al interior del mortero no se pudo observar una relación que permita determinar el módulo de elasticidad estático por compresión conocido módulo de elasticidad dinámico por ultrasonidos.

3.4 Evaluación de la monitorización del daño por agrietamiento en morteros de cemento con residuos metálicos

Como se ha descrito en la sección 2.9, en este estudio se ha medido la variación de la resistencia eléctrica en las muestras con residuos metálicos durante los ensayos de flexión, con el objetivo de evaluar la monitorización del daño por agrietamiento. En la Figura 17 se muestran todos los valores de resistencia eléctrica en función del ancho de grieta, independiente del contenido de residuo metálico y edad de curado, para los dos diferentes tipos de residuos metálicos utilizados en este estudio.

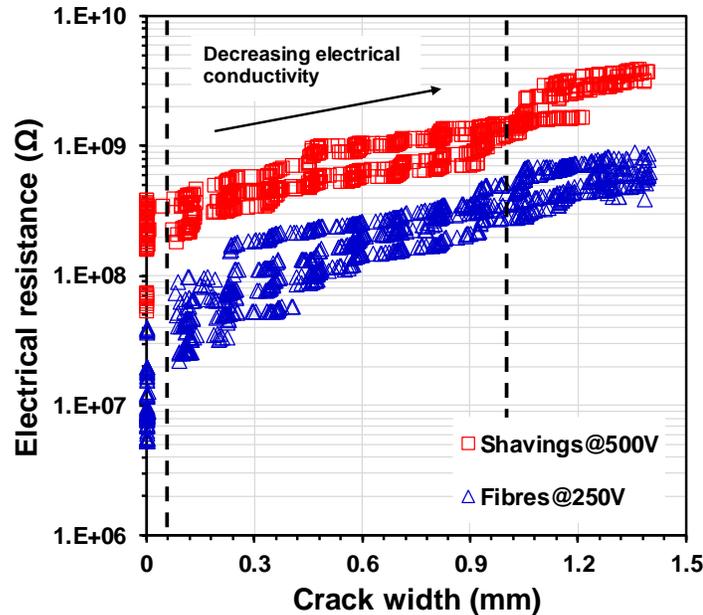


Figura 17. Resultados de la resistencia eléctrica medida en las muestras de mortero con residuos metálicos en función del ancho de la grieta.

En estudios anteriores se ha demostrado que en las muestras de mortero con virutas y fibras de acero no existen diferencias significativas entre los valores de resistencia eléctrica medidos para distintos contenidos de residuos metálicos y edades de curado (Norambuena-Contreras et al., 2017a). Por lo tanto, con el objetivo de comprobar que en este estudio el contenido de residuos metálicos y edad de curado no presentó una clara influencia sobre la resistencia eléctrica de las muestras, se ha desarrollado un análisis de probabilidad de todos los resultados de resistencia eléctrica. De este modo, los valores de resistencia eléctrica independiente del contenido de residuos metálicos y edad de curado, han sido ajustados a una función de probabilidad tipo Log-normal, ver Figura 18. En esta Figura, se observa que todos los resultados pueden ser alineados en una recta 1:1, lo que comprueba que la cantidad de residuos metálicos y la edad de curado, no presentan un efecto significativo sobre la resistencia eléctrica de las muestras ensayadas. De esta manera, se demuestra que independiente del contenido de residuos metálicos y la edad todos los datos de resistencia eléctrica pueden ser considerados de una misma población. Se ha utilizado una distribución de probabilidad Log-normal teniendo en cuenta que la resistencia eléctrica puede ser modelada como un proceso estocástico (Castillo, 2012). Esto se debe a que el flujo de corriente eléctrica que circula a través del mortero con residuos metálicos durante el ensayo a flexión corresponde a un proceso aleatorio que depende del tiempo de ensayo. Esto ocurre debido a que a medida que aumenta el tiempo de ensayo y crece el ancho de grieta la conexión de los residuos metálicos al interior del mortero se ve modificada.

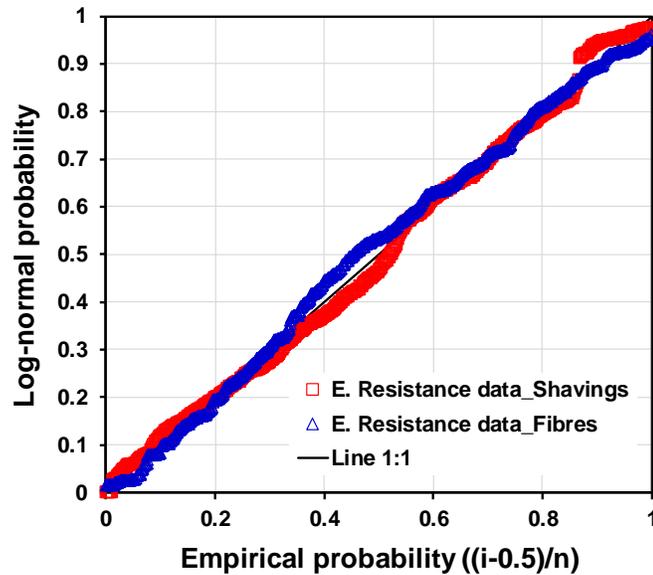


Figura 18. Gráfico probabilidad-probabilidad para los valores de resistencia eléctrica en muestras de mortero con virutas y fibras.

Por otra parte, en este estudio se ha demostrado que el contenido de residuos metálicos y edad de curado, no presentaron un efecto significativo sobre la resistencia a la flexión de los morteros ensayados, ver Figura 13(a). Por estas razones, los valores de resistencia eléctrica registrados durante el ensayo de flexión para las muestras con virutas y fibras fueron analizados independientes de su contenido de residuos metálicos y edad de curado, ver Figura 17. En la Figura 17 se puede observar que la relación entre el ancho de grieta y la resistencia eléctrica es no lineal, y que la resistencia eléctrica aumenta a medida que crece el ancho de la grieta. Del mismo modo otros autores como Pour-Ghaz et al., 2013 han demostrado esta relación no lineal entre la resistencia eléctrica y la apertura de grieta, pero para un número de datos mucho menor. Adicionalmente, en la Figura 17 se observa que, para un mismo valor de apertura de grieta, los valores de resistencia eléctrica fueron mayores en las muestras de mortero con virutas. A su vez, el voltaje necesario para la medida de resistencia eléctrica en las muestras con virutas fue el doble que en las muestras con fibras, 500 y 250V, respectivamente. No obstante, al analizar la resistividad eléctrica promedio en las virutas de acero ($1.67 \times 10^{-5} \Omega m$) resultó ser un 25% menor que la resistividad eléctrica de las fibras de lana de acero ($2.23 \times 10^{-5} \Omega m$), debido a un mayor porcentaje de Silicio y Carbono en su composición. Por lo tanto, las virutas demostraron ser mejores conductoras eléctricas que las fibras. Sin embargo, las fibras al tener una mayor relación de aspecto y ser más flexibles (Ver Figura 1), pudieron haber formado canales conductores en el interior del mortero. Por el contrario, y de acuerdo lo mencionado anteriormente, las virutas al ser más rígidas, debido a la presencia de Cromo

en su composición, ver Tabla 2, pudieron haberse triturado durante el proceso de mezclado, disminuyendo su probabilidad de formar canales conductores. Por estas razones, los morteros con fibras pudieron haber sido mejores conductores que los morteros con virutas. Por otra parte, de acuerdo a la variación de la resistencia eléctrica, en el gráfico Semi-logarítmico de la Figura 17, se distinguen tres zonas distintas. La primera zona corresponde a los valores de resistencia eléctrica asociados a la aparición de la grieta (anchos de grieta menores a 0.06mm). En esta zona se observa que el rango de valores de resistencia eléctrica es amplio y poco claro. Es por esto que, con el objetivo de conocer la probabilidad de ocurrencia de los valores de resistencia eléctrica, se han graficado histogramas de frecuencia basados en una distribución Log-normal para todos los datos validos de resistencia eléctrica obtenidos durante los ensayos de flexión de las muestras con residuos metálicos, ver Figura 19. En la Figura 19(a) se observa que para las muestras con virutas el 53.3% de los resultados varían entre $4 \times 10^8(\Omega)$ y $8 \times 10^8(\Omega)$. A su vez, en la Figura 19(b) se observa que para las muestras con fibras el 54.7 % de los resultados varía entre $8 \times 10^7(\Omega)$ y $2.4 \times 10^8(\Omega)$. Además, al comparar ambos gráficos se puede observar una mejor distribución de los datos en las muestras de mortero con fibras. Asimismo, en la Figura 19 se puede observar que el número de datos para las muestras con virutas es menor que el número de datos para las muestras con fibras, 860 y 1047 datos, respectivamente. Esto se debe a que se descartaron aproximadamente un 12% de las muestras con virutas y un 24% de las muestras con fibra, producto de errores de medición o datos dudosos.

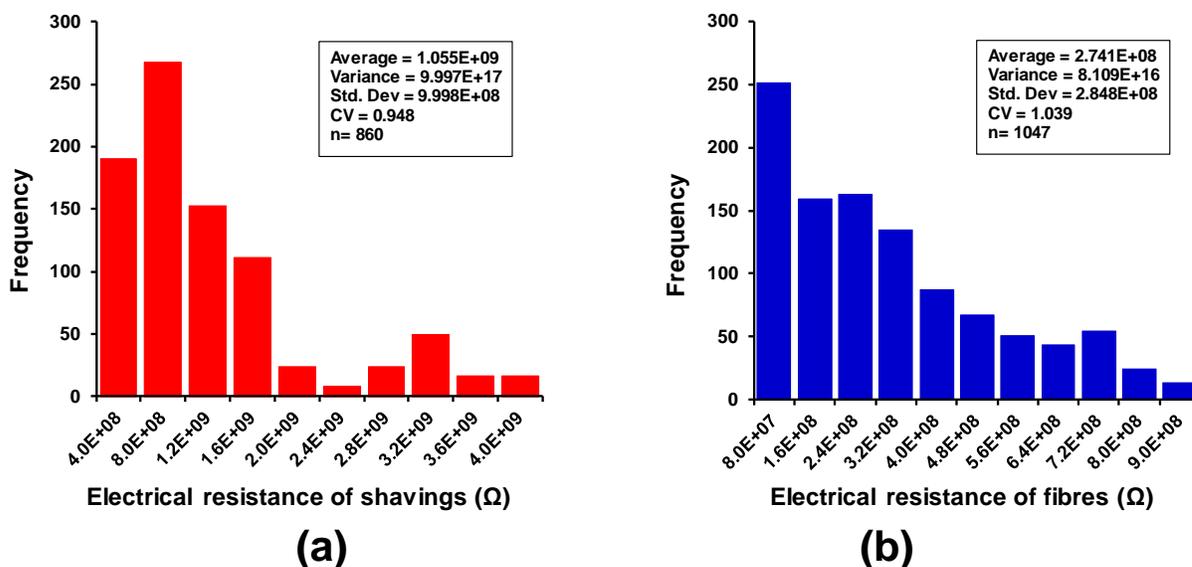


Figura 19. Histograma de frecuencias basado en la función de probabilidad Log-normal para las muestras de mortero con (a) virutas y (b) fibras.

El segundo tramo comprende los valores de resistencia eléctrica asociados a anchos de grieta entre 0.06mm y 1mm. A partir de un valor mínimo de ancho grieta (0.06mm) la resistencia eléctrica aumenta de manera no lineal con la apertura de la grieta, este resultado es similar a lo publicado por Pour-Ghaz et al., 2013. Por último, el tercer tramo está representado por los valores de resistencia eléctrica asociados a anchos superiores a 1mm. A partir de este valor umbral (1mm) la presencia de aire en la grieta tiene una mayor influencia sobre la resistencia eléctrica que los residuos metálicos, esto se puede observar en la dispersión de los valores de resistencia eléctrica en tramo final de la Figura 17. De acuerdo a esto, en la Figura 20 los valores de resistencia eléctrica correspondientes a anchos de grieta mayores a 1mm han sido eliminados. En esta Figura se puede observar que para las muestras con virutas y fibras, la relación entre el ancho de grieta y la resistencia eléctrica se ajusta a una regresión potencial. Los ajustes potenciales de la Figura 20 han dado como coeficientes de determinación (R^2) para muestras con fibras y virutas de 0.8091 y 0.6029, respectivamente, demostrando que estas regresiones potenciales pueden considerarse como un buen ajuste. El incremento potencial de la resistencia eléctrica se debe a la ligera extracción y fractura de los residuos metálicos producto de los esfuerzos mecánicos, ver Figura 11 (Chung, 1998; Nguyen et al., 2015).

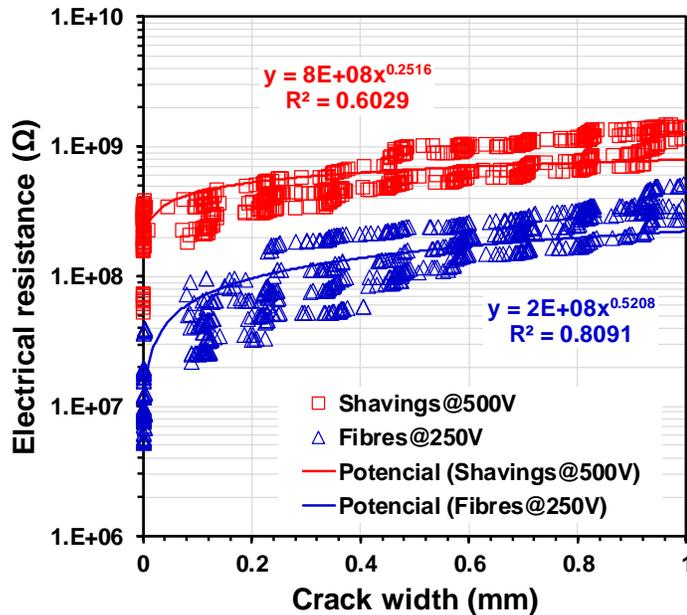


Figura 20. Aumento de la resistencia eléctrica con el aumento del ancho de la grieta, hasta un ancho de grieta máximo de 1 mm.

Por lo tanto, estas ecuaciones podrían ser utilizadas para la determinación del daño por agrietamientos en morteros reforzados con residuos metálicos con características morfológicas similares a las utilizadas en este estudio. Además, de acuerdo a los resultados obtenidos y la metodología utilizada en este estudio, todos los contenidos de residuos metálicos empleados contribuyen con el monitoreo del daño. Sin embargo, en este estudio se recomienda la incorporación de un 4% de residuos metálicos en el mortero, debido a que mejora las propiedades mecánicas respecto al mortero de referencia y la porosidad es menor respecto a morteros con contenidos de residuos metálicos mayores. Finalmente, la incorporación de los residuos metálicos en los morteros presenta potenciales aplicaciones dentro de la ingeniería civil, como lo son fabricación de: morteros con propiedades mecánicas mejoradas y morteros inteligentes con propiedades de auto-monitorización del daño. Sin embargo, el principal beneficio de la incorporación de residuos metálicos en los morteros es que permite darles una nueva utilidad a estos residuos, contribuyendo de esta manera con la eliminación de desechos y reduciendo el impacto medioambiental.

4 CONCLUSIONES

En esta Tesis se ha evaluado la influencia del tipo y contenido de los residuos metálicos sobre las propiedades mecánicas y de auto-monitorización de los morteros de cemento. Para ello, se han estudiado en laboratorio nueve diferentes morteros de cemento, con la misma relación agua/cemento (0.5), pero con dos residuos metálicos diferentes (fibras y virutas de acero), y cuatro porcentajes de adición (4%, 8%, 12% y 16%). Para cada combinación posible, se han determinado las propiedades mecánicas mediante los ensayos de flexión y de compresión. En cuanto a la monitorización, se ha estudiado la variación, en tiempo real, de la resistencia eléctrica de las probetas sometidas a flexión. De este modo, a partir de los principales resultados obtenidos en esta investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- A partir de la caracterización morfológica realizada por microscopía óptica y electrónica, se pudo concluir que las virutas de acero presentaron un aspecto superficial más rugosa y una geometría mucho más variable e irregular que las fibras de lana de acero, las cuales presentaron una mayor esbeltez.
- De acuerdo a las propiedades físicas de los morteros se encontró que la relación entre la densidad aparente y la porosidad de las muestras analizadas fue lineal, donde un mayor porcentaje de cualquiera de los dos residuos metálicos estudiados conllevó a un aumento en la porosidad y una disminución de la densidad del mortero resultante. Esta disminución se debió al aumento del volumen total de las muestras.
- En general, los morteros con fibras presentaron una mayor porosidad respecto a los morteros con virutas. Esto ocurrió debido a la formación de agrupaciones de fibras de lana de acero (clusters) en el interior de los morteros. Además, se concluyó que la edad de curado no tuvo una influencia significativa sobre porosidad y la densidad aparente de las muestras.
- Por otra parte, en este estudio se ha observado que las resistencias a flexión y a compresión aumentaron proporcionalmente con el contenido de residuos metálicos adicionados a los morteros. Además, se observó que las muestras con virutas presentaron valores promedios mayores de resistencia a flexión y a compresión respecto a las muestras con fibras. Esto se debió al aspecto superficial rugoso que presentaron las virutas, el cual mejoró la adherencia en la interfaz matriz-viruta. Sin embargo, en este estudio se comprobó mediante un análisis de probabilidad que el tipo, cantidad de residuos metálicos y edad de curado, no presentaron un

efecto significativo sobre la resistencia a la flexión y a la compresión de los morteros ensayados.

- Adicionalmente, se comprobó que los módulos de elasticidad estáticos medidos por compresión resultaron menores que los módulos de elasticidad dinámicos medidos por ultrasonidos, debido a la naturaleza no lineal de la curva esfuerzo-deformación obtenida en el ensayo de compresión. Además, se comprobó que el tipo, cantidad de residuos metálicos y edad de curado no influyeron en el incremento de los módulos de elasticidad respecto de una muestra sin residuos metálicos.
- Por otra parte, en este estudio se observó que los valores de resistencia eléctrica para una misma apertura de grieta, fueron menores en las muestras de mortero con fibras de lana de acero que en las muestras con virutas de acero. Debido a que las fibras pudieron haber formado canales conductores en el interior del mortero. Por el contrario, durante el proceso de mezclado las virutas tuvieron una mayor tendencia a triturarse, lo que disminuyó la probabilidad de formar canales conductores. Asimismo, se comprobó que a partir de un ancho de grieta de 1mm, la presencia de aire en la grieta tuvo una mayor influencia sobre la resistencia eléctrica que los residuos metálicos.
- Adicionalmente, se comprobó que existe una relación no lineal entre el ancho de grieta y la resistencia eléctrica, ajustándose a un modelo potencial, donde la resistencia eléctrica aumenta a medida que crece el ancho de grieta. De este modo, en este estudio se han propuesto dos ajustes potenciales que podrían utilizarse para determinar el daño del mortero con virutas y fibras.
- Finalmente, se ha observado que todos los contenidos de residuos metálicos empleados en este estudio posibilitan la monitorización del daño. Sin embargo, se recomienda incorporar un 4% de fibras de lana de acero, debido a que este contenido ha mejorado las propiedades físicas, mecánicas y eléctricas del mortero. Por lo tanto, en esta investigación se ha podido concluir que los morteros con residuos metálicos podrían ser potencialmente utilizados para el desarrollo de nuevos materiales cementicios con propiedades mecánicas mejoradas y propiedades de auto-monitorización del daño.

5 REFERENCIAS

- Angela Gaio Graeff, Kypros Pilakoutas, Kyriacos Neocleous, Maria Vania N.N. (2012). Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*, 45, 385-395.
- ASTM C348-14. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM International. West Conshohocken, PA; 2014.
- ASTM C349-14. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). ASTM International, West Conshohocken, PA; 2014.
- ASTM C595/C595M-16. Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. ASTM International, West Conshohocken, PA; 2016.
- ASTM C597-16. Standard test method for pulse velocity through concrete; ASTM International: West Conshohocken, PA; 2016.
- ASTM C642-13. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International. West Conshohocken, PA; 2013.
- Banthia, N., & Dubeau, S. (1994). Carbon and steel microfiber-reinforced cement-based composites for thin repairs. *Journal of materials in civil engineering*, 6(1), 88-99.
- Bentur, A., & Mindess, S. *Fiber reinforced cementitious composites* (2nd Ed.). Taylor & Francis, Abingdon, Oxon, UK; 2007.
- Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite structures*, 86(1), 3-9.
- Cao, J., & Chung, D.D.L. (2002). Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1657-1661.
- Castillo, E. *Extreme value theory in engineering*. Elsevier, Chicago, USA; 2012.
- Çavdar, A. (2014). Investigation of freeze-thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, 58, 463-472.

- Chung, D. D. L. (1998). Self-monitoring structural materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 22(2), 57-78.
- Chung, D. D. L. (2012). Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing. *Carbon*, 50(9), 3342-3353.
- EN 196-3:2005+A1:2009. Methods of testing cement-Part 3: Determination of setting times and soundness. CEN European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2009.
- García A., Norambuena-Contreras J., Partl M.N., & Schuetz P. (2013). Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. *Constr Build Mater*, 43, 107-117.
- Holschemacher, K., Mueller, T., & Ribakov, Y. (2010). Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials & Design*, 31(5), 2604-2615.
- Huang, H., Ye, G., Qian, C., & Schlangen, E. (2016). Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. *Materials & Design*, 92, 499-511.
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological engineering*, 36(2), 230-235.
- Kim, D. J., Kang, S. H., & Ahn, T. H. (2014). Mechanical Characterization of high-performance steel-fiber reinforced cement composites with self-healing effect. *Materials*, 7(1), 508-526.
- Koenig, A., & Dehn, F. (2016). Main considerations for the determination and evaluation of the acid resistance of cementitious materials. *Materials and Structures*, 49(5), 1693-1703.
- Lee, S. F., & Jacobsen, S. (2011). Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and structures*, 44(8), 1451-1465.
- Liu, Z., & Hansen, W. (2015). Pore damage in cementitious binders caused by deicer salt frost exposure. *Construction and Building Materials*, 98, 204-216.
- Martinelli, E., Caggiano, A., & Xargay, H. (2015). An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial/Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 290-298.

- Meehan, D. G., Wang, S., & Chung, D. D. L. (2010). Electrical-resistance-based sensing of impact damage in carbon fiber reinforced cement-based materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(1), 83-105.
- Nguyen, D. L., Song, J., Manathamsombat, C., & Kim, D. J. (2015). Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension. *Composites Part B: Engineering*, 69, 159-168.
- Nishiwaki, T., Koda, M., Yamada, M., Mihashi, H., & Kikuta, T. (2012). Experimental study on self-healing capability of FRCC using different types of synthetic fibers. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 195-206.
- Norambuena-Contreras J, Quilodrán J, Chávez M, Borinaga-Treviño R (2017a). Effect of metallic waste content on the electrical and thermal properties of cement mortars”. *Construction and Building Materials* (under review).
- Norambuena-Contreras J., Silva-Robles E., Gonzalez-Torre I., & Saravia-Montero Y. (2017b). Experimental evaluation of mechanical and thermal properties of recycled rubber membranes reinforced with crushed polyethylene particles. *Journal of Cleaner Production*, 145, 85-97.
- Norambuena-Contreras, J., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., Celaya, M., & Lombillo-Vozmediano, I. (2010). Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. *Ndt & E International*, 43(7), 629-634.
- Norambuena-Contreras, J., Gutierrez Aguilar, V., Gonzalez-Torre, I. (2015). Physical and mechanical behaviour of a fibre-reinforced membrane with self-healing purposes via microwave heating. *Constr Build Mater*, 94, 45-56.
- Norambuena-Contreras, J., Thomas, C., Borinaga-Treviño, R., Lombillo, I. (2016). Influence of recycled carbon powder waste addition on the physical and mechanical properties of cement pastes. *Materials and Structures/ Materiaux et Constructions*, 49(12), 5147-5159.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, 25(2), 575-581.
- Pour-Ghaz, M., Barrett, T., Ley, T., Materer, N., Apblett, A., & Weiss, J. (2013). Wireless crack detection in concrete elements using conductive surface sensors and radio frequency identification technology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(5), 923-929.

- Pour-Ghaz, M., Poursaee, A., Spragg, R., & Weiss, J. (2011). Experimental methods to detect and quantify damage in restrained concrete ring specimens. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(3), 251-260.
- Quadir, U. M. T., Islam, K., Billah, A. M., & Alam, M. S. (2016). Mechanical and durability properties of concrete using recycled granulated steel. *Construction and Building Materials*, 123, 174-183.
- Sengul, O. (2016). Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires. *Construction and Building Materials*, 122, 649-658.
- Sierra-Beltran, M. G., Jonkers, H. M., & Schlangen, E. (2014). Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair. *Construction and Building materials*, 67, 344-352.
- Valentini L., Parisatto M., Russo V., Ferrari G., Bullard J.W., Angel R. J., Dalconi M.C, & Artioli, G. (2014). Simulation of the hydration kinetics and elastic moduli of cement mortars by microstructural modelling. *Cement and Concrete Composites*, 52, 54-63.
- Wang, H. T., & Wang, L. C. (2013). Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 1146-1151.
- Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 8-14.
- Yoo, D. Y., Lee, J. H., & Yoon, Y. S. (2013). Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 106, 742-753.
- Zhutovsky, S., & Hooton, R. D. (2017). Experimental study on physical sulfate salt attack. *Materials and Structures*, 50(1), 54.