

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)**

**INFLUENCIA DEL TIPO Y CONTENIDO DE
RESIDUO METÁLICO EN LAS PROPIEDADES
ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS DE MORTEROS
CEMENTICIOS**

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

JAVIERA QUILODRÁN PINO

Concepción, Marzo de 2017

DEDICATORIA

A mis padres por su infinito apoyo en este proceso y siempre.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía, Dr. José Norambuena por su incesante ayuda y por la confianza que depositó en mi para realizar esta investigación. Admiro profundamente su trabajo en la investigación científica como profesional destacado y también como gran ser humano.

De igual manera, mi agradecimiento al equipo del LabMAT, al Ing. José Luis Concha por su capacitación con los equipos del laboratorio, y por su disposición a resolver mis dudas. A la Mg. Irene González-Torre por su gran voluntad a ayudarme, y por su compañía durante el tiempo que duró la parte experimental de la Tesis.

También agradezco al Dr. Roque Borinaga de la Universidad del País Vasco por compartir su valiosa experiencia y su ayuda en la fabricación de las probetas de ensayo. Al Ing. Manuel Chávez de la Universidad Andrés Bello por facilitarnos el Laboratorio de Ingeniería Civil de su universidad y por la ayuda durante todo el tiempo de fabricación, de su laboratorista Olga Iturra.

Agradecer desde lo más profundo, a mis padres, Jaime y Sandra, por entregarme lo mejor de ellos siempre, por ser parte de cada momento de mi vida, por sus palabras de aliento cuando fueron necesarias y por su cariño incondicional. A mi hermano por su preocupación constante y a mis abuelos por su mirada de admiración, estando más seguros que yo de todo lo que puedo lograr, desde el primer día.

Finalmente, agradezco a mi compañero durante este proceso, Ariel Cartes gracias por tu cariño y por todos los momentos felices de nuestra vida universitaria.

INFLUENCIA DEL TIPO Y CONTENIDO DE RESIDUO METÁLICO EN LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS DE MORTEROS CEMENTICIOS

Javiera Quilodrán Pino
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
jaquilod@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 sobre las propiedades volumétricas, eléctricas y térmicas de morteros cementicios. 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, se evaluó la distribución de los residuos metálicos, la resistividad eléctrica y la conductividad térmica mediante ensayos no-destructivos, en probetas prismáticas de mortero con y sin adición de residuos metálicos. Los principales resultados obtenidos en este estudio mostraron que la adición de residuos metálicos reduce la densidad aparente e incrementa la porosidad de los morteros. Además, se ha comprobado que a través de la medida del tiempo ultrasónico es posible evaluar la distribución de los residuos metálicos al interior de los morteros, siendo esta evaluación más efectiva en muestras con fibras que con virutas. Asimismo, se ha comprobado que los residuos metálicos pueden modificar la resistividad eléctrica y conductividad térmica de los morteros, independiente del tipo y contenido de residuo metálico utilizado. Finalmente, en base a los análisis de probabilidad se determinó que el tipo y contenido de residuos metálicos, así como la edad de curado utilizados en esta investigación, no presentaron una influencia significativa en la variación de la resistividad eléctrica y conductividad térmica de los morteros cementicios evaluados.

Palabras claves: Morteros cementicios; Fibras de lana de acero; Virutas de acero; Tiempo ultrasónico; Resistividad eléctrica; Conductividad térmica.

8900 + 21 Figuras/Tablas*250 + 1 Figura/Tabla* 500 = 14650 Palabras Totales

INFLUENCE OF THE TYPE AND AMOUNT OF METALLIC WASTE ON THE ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF CEMENT MORTARS

Javiera Quilodrán Pino

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

jaquilod@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, the metallic waste distribution, electrical resistivity and thermal conductivity in prismatic mortar specimens with and without addition of metallic waste were evaluated by using non-destructive tests. The main results obtained in this study showed that the addition of metallic waste produced a reduction of the bulk density and an increase of the porosity of mortars. In addition, it was proven that it is possible to evaluate the metallic waste distribution inside the mortars by the measurement of the ultrasonic pulse propagation time, and that this evaluation is more effective in specimens with fibres than in those with shavings. Likewise, it was proven that metallic waste can modify the electrical resistivity and the thermal conductivity of the mortars, regardless the type and amount of metallic waste. Finally, based on the probability analysis, it was concluded that both the type and amount of metallic waste, and the curing age used in this research did not present a significant influence on the variation of the electrical resistivity and thermal conductivity of the evaluated cement mortars.

Keywords: Cement mortars; Steel wool fibres; Steel Shavings; Ultrasonic time; Electrical resistivity; Thermal conductivity.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	HIPÓTESIS.....	3
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.3.1	<i>Objetivo general</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	4
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	DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD DE LAS MUESTRAS.....	8
2.6	EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUOS METÁLICOS EN EL INTERIOR DE LAS MUESTRAS USANDO ULTRASONIDO	9
2.7	MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO.....	10
2.8	MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO	11

2.9	VARIABLES EXPERIMENTALES EVALUADAS EN ESTE ESTUDIO	13
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
3.1	ANÁLISIS DE LA MORFOLOGÍA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS CORTADOS MECÁNICAMENTE	13
3.2	INFLUENCIA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS.	16
3.3	ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUOS METÁLICOS AL INTERIOR DE LOS MORTEROS.	19
3.4	INFLUENCIA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS EN LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS.	22
4	CONCLUSIONES	26
5	REFERENCIAS	28

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición química de los óxidos medida a través de XRF para el cemento Portland-Puzolánico y la arena fina utilizada en este estudio.	4
Tabla 2.	Análisis elemental medido a través de 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 de cemento.	6
Tabla 4.	Variables incluidas en el estudio experimental.	13
Tabla 5.	Longitud y ancho promedio de las virutas de acero clasificadas por tipología.	16

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.	(a) Puntos de medición en las muestras prismáticas; (b) equipos y ensayo de ultrasonido directo.	9

Figura 4. Medición de la resistencia eléctrica de las probetas prismáticas de morteros de cemento.	10
Figura 5. (a) Controlador manual y sensor térmico; (b) medición de la conductividad térmica... 12	12
Figura 6. 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.....	14
Figura 7. Histograma de frecuencia basado en la función de probabilidad tipo Weibull para la (a) longitud y (b) ancho de las virutas.	15
Figura 8. Histograma de frecuencia basado en la función de probabilidad tipo Weibull para la (a) longitud y (b) diámetro de las fibras.....	15
Figura 9. Relación entre la (a) densidad aparente y la (b) porosidad de las muestras para diferentes contenidos de residuos metálicos y tiempos de curado.	17
Figura 10. Resultados de la densidad aparente en función de la porosidad, medidas en las muestras de mortero.....	18
Figura 11. Relación entre el tiempo ultrasónico promedio y la posición correspondiente en cada muestra de ensayo: reforzadas con (a) virutas de acero y (b) fibras de lana de acero.....	19
Figura 12. Relación entre (a) el tiempo ultrasónico promedio y (b) tiempo ultrasónico a través de la longitud de las muestras con distinto tipo y contenido de residuos metálicos evaluadas para diferentes edades de curado.....	20
Figura 13. Relación entre la resistividad eléctrica y el contenido de residuos metálicos: (a) probetas con virutas y (b) probetas con fibras.....	22
Figura 14. Influencia del tipo y contenido de residuos metálicos en el interior de los morteros: (a) alto contenido de virutas y (d) alto contenido de fibras. Figura basada en Wang H. et al., 2016.....	23
Figura 15. Relación entre la conductividad térmica y contenido de residuos metálicos: (a) probetas con virutas y (b) probetas con fibras.....	24
Figura 16. Relación entre la conductividad térmica y la porosidad de los morteros.....	25
Figura 17. Gráfico de probabilidad-probabilidad tipo Weibull para datos de (a) resistividad eléctrica y (b) conductividad térmica.	26

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Un mortero de cemento es un material de construcción compuesto de cemento, áridos y agua. Este material compuesto presenta buenas propiedades físicas, mecánicas y térmicas, que lo hacen un material ampliamente utilizado en la ingeniería civil (Mindess et al., 2002). Sin embargo, las condiciones ambientales combinadas con las cargas externas contribuyen al deterioro prematuro de este material (Cao&Chung, 2002; Çavdar, 2014; Liu & Hansen, 2015; Koenig & Dehn, 2016; Zhutovsky & Hooton, 2017), reduciendo su resistencia mecánica y durabilidad en el tiempo. 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; Brandt, 2008; Yoo et al., 2013; Kim et al., 2014). En la actualidad se utilizan diferentes tipos de fibras que aportan características físicas y mecánicas particulares al mortero resultante (Bentur & Mindess, 2007). Entre las fibras más empleadas, se encuentran: fibras naturales (palma, celulosa, cáñamo, etc.) (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011), fibras de carbono (Norambuena-Contreras et al., 2016), fibras sintéticas (polipropileno, polietileno, alcohol polivinílico, etc.) (Quadir et al., 2016) y fibras metálicas (Martinelli et al., 2015; Sengul, 2016). En este contexto, Banthia & Dubeau, 1994 han demostrado que el uso de fibras de carbono y acero aumentan la capacidad de adherencia del mortero reforzado, pudiendo ser usado para reparar elementos estructurales. 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, como son las fibras de carbono o acero y las partículas trituradas o virutas de acero (Nagy et al., 2015). Asimismo, el uso de residuos metálicos reciclados para el refuerzo de materiales cementicios ayuda también a resolver el problema de la eliminación de los desechos industriales (Norambuena-Contreras et al., 2016). Existen diversos estudios en los que se ha analizado la influencia de las residuos metálicos reciclados (fibras, virutas y polvo) sobre las propiedades físico-mecánicas (Banthia & Dubeau, 1994; Martinelli et al., 2015; Norambuena-Contreras et al., 2016; Quadir et al., 2016; Sengul, 2016), térmicas (Khaliq & Kodur, 2011; Corinaldesi et al., 2011; Nagy et al., 2015; Girardi et al., 2017) y eléctricas (Banthia et al., 1992; Xie et al., 1996; Lataste et al., 2008; Solgaard et al., 2014) de los materiales a base de cemento. Por ejemplo, Norambuena-Contreras et al., 2016 han evaluado el efecto de la adición de residuos de polvo de carbono reciclado (micro-fibras de carbono) sobre las propiedades físicas y mecánicas de pastas de cemento Portland. Como resultado, la adición de micro-fibras de carbono recicladas

produce una disminución de la densidad aparente y un aumento de la porosidad de las pastas de cemento, afectando también a sus propiedades mecánicas. En este contexto, Quadir et al., 2016 han sustituido de manera parcial los áridos finos de hormigones por granos de acero reciclado. Como resultado, la resistencia a la flexión de los hormigones reforzados fue aproximadamente un 40% superior al hormigón sin refuerzo. 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. Contrario al trabajo de Quadir et al., 2016, en su estudio comprobaron que las muestras con mayor porcentaje de fibras recicladas presentan una menor resistencia mecánica que muestras reforzadas con un mayor porcentaje de fibras comerciales. Asimismo, Banthia et al., 1994 y Sengul, 2016 demostraron que las fibras de acero recicladas procedentes de neumáticos fuera de uso y micro-fibras de acero, pueden ser usadas para reforzar materiales a base de cemento. Por otra parte, Nagy et al., 2015 han comparado diferentes tipologías de fibras en hormigones, concluyendo que hormigones reforzados con fibras de acero presentan valores de densidad aparente y conductividad térmica más altos que muestras reforzadas con fibras sintéticas. Esto se debió a la mayor conductividad térmica del acero y al aumento de la densidad del hormigón resultante. Sin embargo, concluyen que un mayor contenido de fibras metálicas puede reducir dicho efecto debido al incremento de la porosidad asociada. Resultados similares también fueron reportados por Corinaldesi et al., 2011 en morteros reforzados con residuos. Asimismo, Girardi et al., 2017 evaluaron la conductividad térmica de hormigones reforzados con residuos metálicos con fines de energía térmica en centrales termo-solares. Como resultado, adicionando un 1% en volumen de residuos metálicos, aumentaron a más del doble el valor de la conductividad de hormigones sin residuos. Asimismo, Khaliq & Kodur, 2011 estudiaron la influencia del tipo de fibra y temperatura ambiente sobre las propiedades térmicas de hormigones. Adicionando un 1.75% de fibras de polipropileno, acero o ambos, concluyeron que para todas las temperaturas estudiadas (desde temperatura ambiente hasta 1000°C) las fibras de acero aumentaban la conductividad térmica, mientras que las de polipropileno la disminuían. Sin embargo, el aumento de la conductividad térmica no fue tan significativo como en el caso de Girardi et al., 2017. Por otra parte, Banthia et al., 1992 analizaron la influencia del contenido de micro-fibras de carbono y acero en la variación de la resistividad eléctrica de pastas de cemento. Concluyeron que cuanto mayor era el porcentaje de fibras adicionado a la matriz de cemento, menor era la resistividad eléctrica registrada. Además, observaron que las muestras con fibras de carbono presentaron una mayor disminución de la resistividad eléctrica comparada con muestras con fibras de acero, y que

la distribución de las fibras en el interior del material presenta mayor influencia que el valor de la resistividad eléctrica. En estudios previos (Xie et al., 1996), se ha comprobado que la resistividad eléctrica de materiales cementicios reforzados con fibras eléctricamente conductoras disminuye hasta un punto donde la resistividad eléctrica se mantiene constante, conocido como punto de percolación. Por otra parte, Lataste et al., 2008 y Solgaard et al., 2014 concluyeron que la variación de las propiedades eléctricas de materiales cementicios reforzados con fibras metálicas, depende de la cantidad y morfología de las fibras adicionadas, sus propiedades físico-mecánicas, contenido de humedad, y su distribución y conectividad en el interior del material, coincidente con Banthia et al., 1992. A pesar de esto, la distribución de las fibras en el interior de los materiales cementicios no suele ser una variable de interés considerada en los estudios (Bentur & Mindess, 2007). Sin embargo, una mala distribución de las fibras puede implicar una mayor porosidad en el material compuesto, lo que puede afectar a sus propiedades físico-mecánicas (Banthia & Dubeau, 1994), térmicas (Nagy et al., 2015) y eléctricas (Lataste et al., 2008). En resumen, la adición de residuos metálicos puede influir en las propiedades del material a base de cemento, aunque no está claro cómo afecta dicha influencia, ni cuál es la cantidad y tipo de residuo óptimo para evitar un impacto negativo en el nuevo material. Por todas estas razones, este estudio tiene como principal objetivo evaluar la influencia del tipo y contenido de dos diferentes residuos metálicos en las propiedades volumétricas (distribución de los residuos), eléctricas y térmicas 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 (4-16%/s/c) han sido fabricados y evaluados a dos diferentes edades de curado (7 y 28 días).

1.2 Hipótesis

- Los residuos metálicos pueden influir en las propiedades termofísicas de los morteros cementicios y presentar ventajas térmicas o eléctricas frente a un mortero sin residuos metálicos

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos en las propiedades eléctricas y térmicas 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.
- Evaluar la distribución espacial de los residuos metálicos en el interior de los morteros usando ultrasonidos y análisis de imágenes.
- Medir la resistividad eléctrica y conductividad térmica de los morteros con y sin adición de residuos metálicos para dos diferentes edades de curado usando ensayos no destructivos.
- 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, Quilodrán J, Chávez M, Borinaga-Treviño R. Effect of metallic waste content on the electrical and thermal properties of cement mortars”. To be submitted in May 2017 to Journal Construction and Building Materials, Elsevier”

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, 2016) 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 a través de XRF para el cemento Portland-Puzolánico y la 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, como 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).

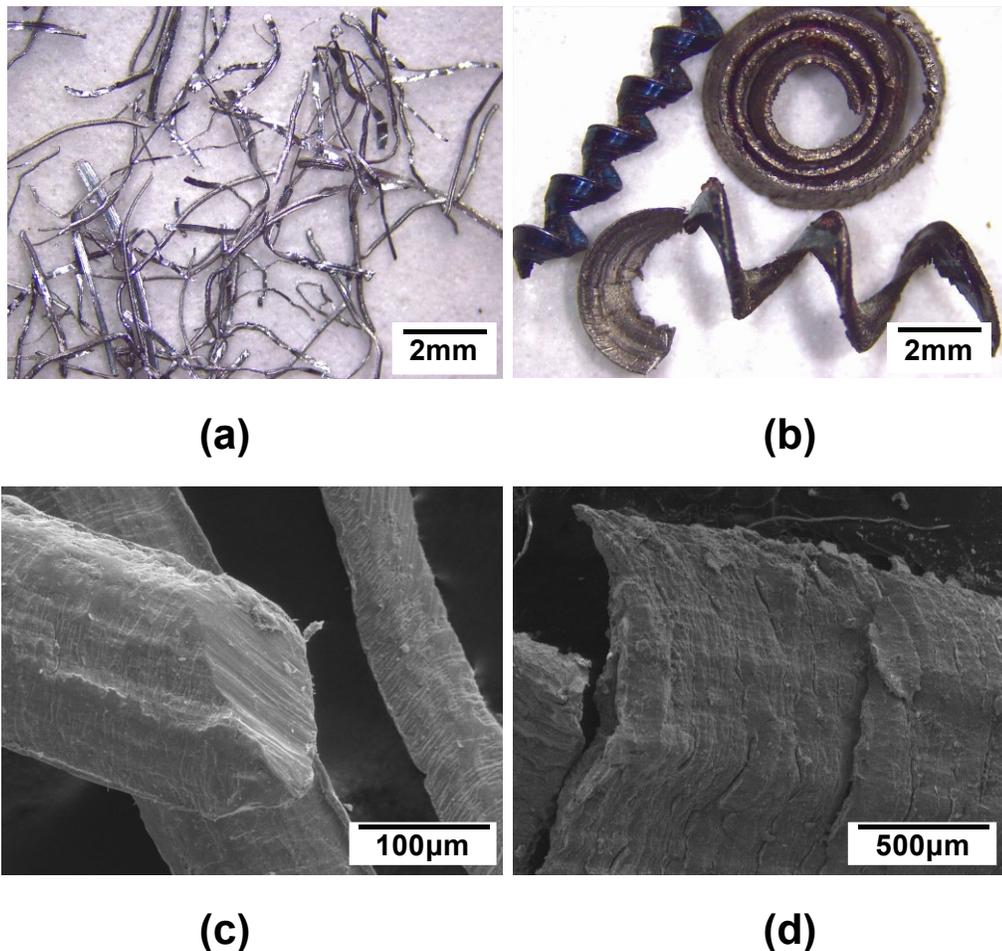


Figura 1. Imágenes ópticas (a-b) e imágenes SEM (c-d) de las fibras de lana de acero y virutas de acero.

Finalmente, el análisis elemental básico del material constituyente de fibras y virutas metálicas recicladas utilizadas en este estudio se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis elemental medido a través de 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 de cemento.

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 estanque de agua con una atmósfera 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 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 se calculó 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.

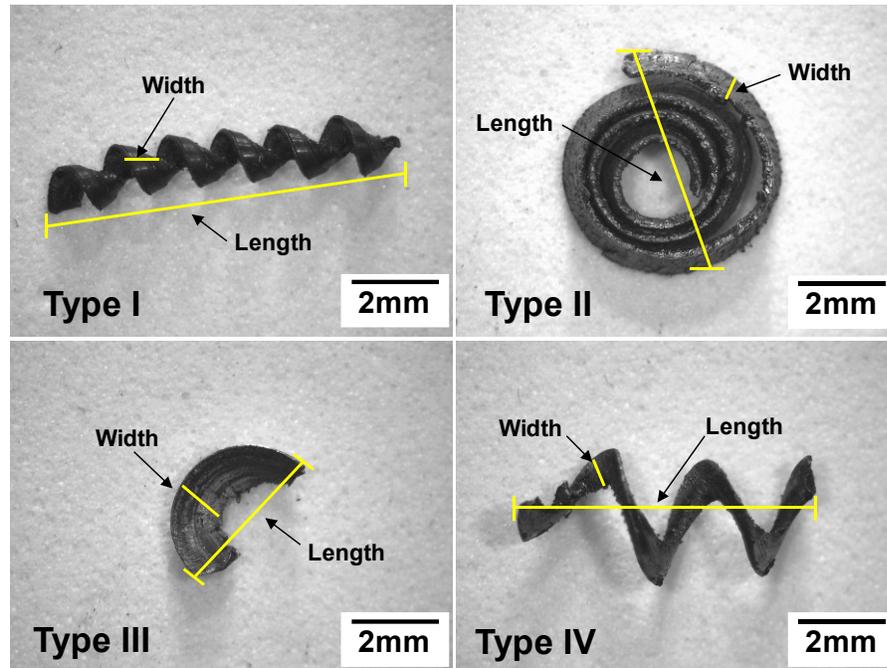


Figura 2. Tipología de las virutas de acero utilizadas: medición de la longitud y ancho.

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.

2.5 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, 2013. 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.

$$\rho = \frac{m_{dry}}{m_{sat} - m_{sub}} \cdot \rho_w \tag{1}$$

$$n = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{m_{sat} - m_{sub}} \tag{2}$$

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.

2.6 Evaluación de la distribución de los residuos metálicos en el interior de las muestras usando ultrasonido

Con el objetivo de evaluar la distribución de los residuos metálicos en el interior de los morteros de cemento después de 7 y 28 días, se midió el tiempo de pulso ultrasónico a través de las muestras prismáticas con y sin residuos metálicos. Todos los ensayos de las muestras se desarrollaron utilizando mediciones ultrasónicas directas en base a las recomendaciones de Norambuena-Contreras et al, 2010. El ensayo de ultrasonido consistió en aplicar un pulso de compresión de alta frecuencia sobre las caras opuestas de las muestras prismáticas, utilizando un transmisor electroacústico. Para ello se utilizó un equipo de ultrasonido modelo 58-E4800 UPV (Controls Group) con 2 transductores piezoeléctricos de 54 kHz (ver Figura 3).

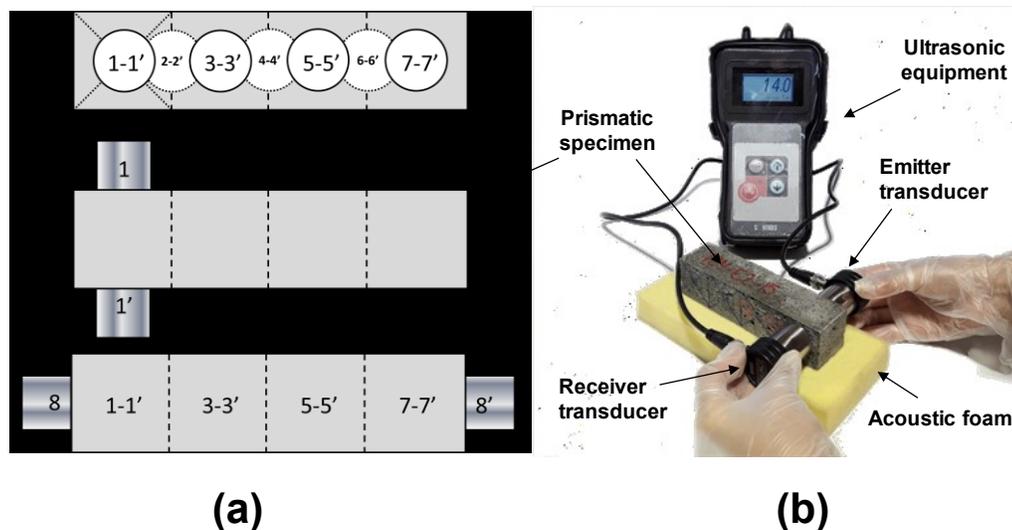


Figura 3. (a) Puntos de medición en las muestras prismáticas; (b) equipos y ensayo de ultrasonido directo.

Además, se utilizó vaselina para asegurar un buen contacto entre los transductores y las caras de la muestra de ensayo. Para realizar los ensayos con el fin de evaluar la distribución de los residuos metálicos dentro de los morteros de cemento, cada muestra se colocó en un soporte de esponja acústica y se midió en 7 puntos a lo largo de su espesor, evaluando así el total de la longitud prismática (ver Figura 3(a) y (b)). Además, todas las muestras se ensayaron también a lo largo de su longitud, ver Figura 3(a). Por lo tanto, el equipo determinó el tiempo de propagación del pulso ultrasónico para cada punto de la muestra, medido en μs . El valor representativo del tiempo de propagación en cada punto se calculó como el promedio de tres repeticiones en el mismo punto. Por lo tanto, los tiempos de pulso ultrasónicos más altos en una muestra con residuos metálicos pueden implicar una alta porosidad del material (zonas con menor densidad) o la presencia de menos residuos metálicos. Por el contrario, tiempos de propagación más bajos pueden asociarse con baja porosidad (zonas de alta densidad) o con alta presencia de residuos metálicos.

2.7 Medición de la resistividad eléctrica de las muestras de ensayo

Para evaluar la influencia del tipo y cantidad de residuos metálicos en la resistividad eléctrica de los morteros de cemento después de 7 y 28 días, se ha medido la resistencia eléctrica de todas las probetas prismáticas con y sin residuos metálicos, ver Figura 4.

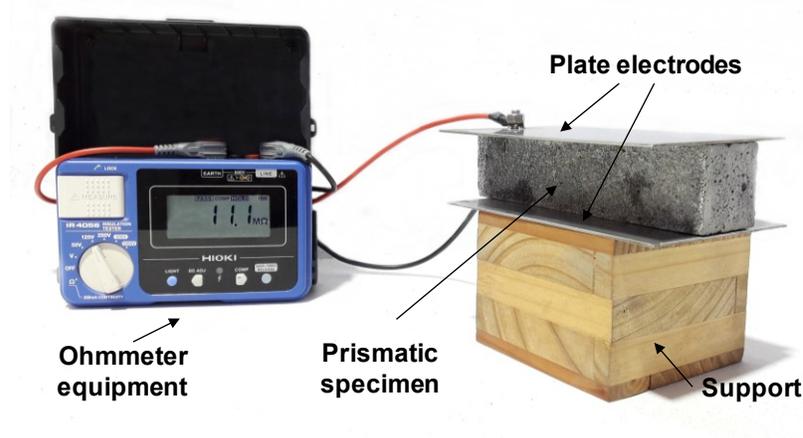


Figura 4. Medición de la resistencia eléctrica de las probetas prismáticas de morteros de cemento.

Para ello, se utilizó un ohmetro modelo HIOKI IR4056-20 conectado a dos electrodos de placa de acero inoxidable con dimensiones de 10x15cm. De este modo, cada electrodo se colocó sobre las caras opuestas de la muestra prismática, asegurándose que las probetas estuvieran centradas y los electrodos de placa alineados. Además, para garantizar un mejor contacto entre el electrodo y la superficie de la muestra, se aplicó una pequeña presión de 1kPa sobre los electrodos. Esto permitió obtener valores estables de resistencia eléctrica en cada medición. Por lo tanto, después de medir

la resistencia eléctrica de cada muestra, la resistividad eléctrica se obtuvo de acuerdo con la segunda ley de Ohm, como se muestra en la ecuación (3):

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad (3)$$

Donde R es la resistencia eléctrica de cada probeta medida en Ohm; S es el área de un electrodo de placa, medida en m^2 ; y l es el ancho de cada probeta, medido en m. Finalmente, se determinó la resistividad eléctrica representativa de cada muestra ensayada como el valor promedio de 3 repeticiones. Por lo tanto, las muestras con valores más bajos de resistividad eléctrica (mayor conductividad eléctrica) pueden atribuirse a mayores contenidos de residuos metálicos y a su mejor conectividad dentro de la matriz de mortero. Por el contrario, valores más altos de resistividad eléctrica (menor conductividad eléctrica) son consecuencia de una baja o nula conectividad entre los residuos metálicos dentro del mortero.

2.8 Medición de la conductividad térmica de las muestras de ensayo

Con el fin de evaluar la influencia del tipo y cantidad de residuos metálicos en la capacidad de transferir el calor de los morteros de cemento después de 7 y 28 días, se ha medido la conductividad térmica de todas las probetas prismáticas con y sin residuos metálicos utilizando una aguja térmica con mecanismo de sonda. Este método se basa en la teoría de fuente de calor lineal transitoria según la norma ASTM D 5334, 2008. Para ello, se utilizó el analizador de propiedades térmicas KD2-Pro de Decagon Devices Inc., que está compuesto por un controlador manual y un sensor térmico (ver Figura 5). En esta investigación, se utilizó el sensor de aguja RK-1 (longitud de 60 mm y diámetro de 3,9 mm) con un rango de medición de 0,1-6,0 W / mK. Para hacer las pruebas, primero se cubrió el sensor térmico con un compuesto térmico polisintético que reduce la presencia de vacíos de aire y la resistencia de contacto entre el sensor y la superficie interna de la muestra. A continuación, el sensor se introdujo en la probeta previamente perforada, ver Figura 5(a). El calor generado por el sensor RK-1 dentro de la muestra generó un gradiente de temperatura, ver Figura 5(b). Luego, el sensor detectó la variación de temperatura y registró los datos. Cada ensayo tuvo una duración total de 10 min.

Finalmente, la conductividad térmica (λ) de cada muestra se calculó mediante las ecuaciones (4) y (5) (Wang Z. et al., 2016):

$$T = m_1 + m_2 \cdot t + m_3 \cdot \ln(t) \quad (4)$$

Donde T es la temperatura registrada; m_1 es la temperatura ambiente durante el calentamiento; m_2 es el gradiente de la variación de la temperatura; m_3 es la pendiente de la recta que relaciona el aumento de la temperatura con el logaritmo de la temperatura; y t es el tiempo de prueba.

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot m_3} \quad (5)$$

Donde λ es la conductividad térmica medida en W / mK; y q es el calor generado por el sensor. Finalmente, la conductividad térmica de cada muestra de ensayo se determinó como el valor promedio de 3 mediciones. De esta manera, los valores más bajos de conductividad térmica pueden atribuirse a muestras con mayor porosidad (menor densidad), o con menores contenidos de residuos metálicos. Por el contrario, valores más altos de conductividad térmica pueden atribuirse a porosidades más bajas (densidades más altas) y mayores contenidos de residuos metálicos.

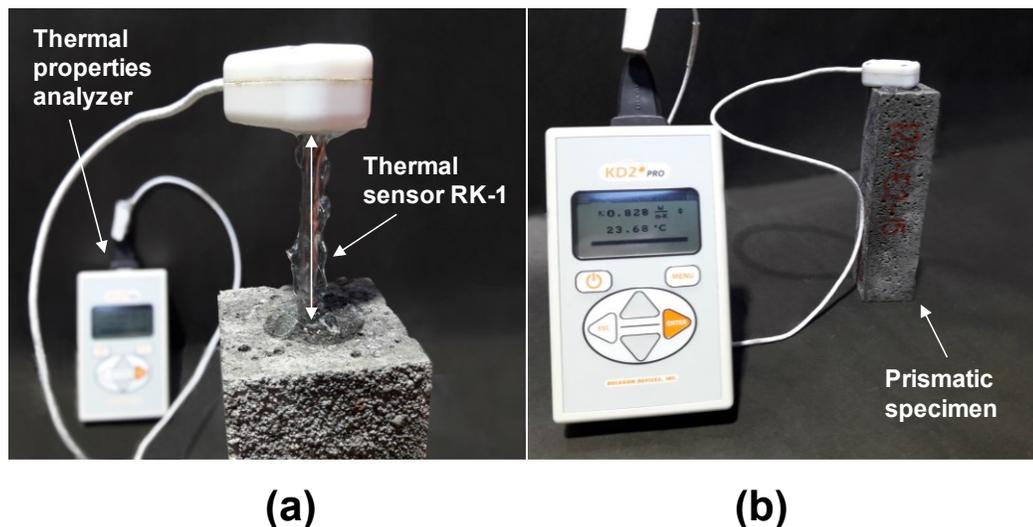


Figura 5. (a) Controlador manual y sensor térmico; (b) medición de la conductividad térmica.

2.9 Variables experimentales evaluadas en este estudio

Finalmente, en la Tabla 4, se muestran las variables incluidas en este estudio y sus abreviaturas. Se ha analizado un total de 11 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. Cinco relacionadas con las propiedades físicas de los morteros de cemento: porcentaje de residuos metálicos, edad de curado, densidad aparente, porosidad y pulso de tiempo ultrasónico de los morteros. Y dos variables referentes a las propiedades eléctricas y térmicas de los morteros: resistividad eléctrica y conductividad térmica, respectivamente.

Tabla 4. Variables incluidas en el estudio experimental.

Classification	Name	Abbreviation	Unit
1. Characteristics of the recycled metallic waste	Diameter of fibres	<i>DF</i>	mm
	Length of fibres	<i>LF</i>	mm
	Width of shavings	<i>WS</i>	mm
	Length of shavings	<i>LS</i>	mm
2. Physical properties of the mortars	Percentages of waste	<i>PW</i>	%
	Curing age	<i>CA</i>	days
	Bulk density	<i>BD</i>	g/cm ³
	Porosity	<i>n</i>	%
3. Electrical and thermal properties of the mortars	Ultrasonic time	<i>UT</i>	μs
	Electrical resistivity	<i>ER</i>	Ω·m
	Thermal conductivity	<i>TC</i>	W/mK

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 6 (a) y Figura 6(b), respectivamente.

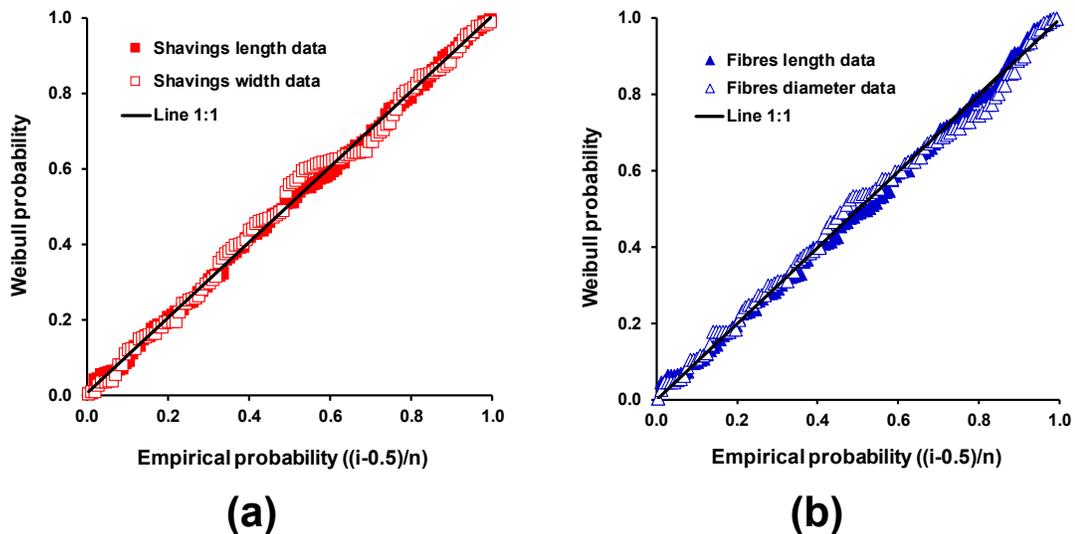


Figura 6. Gráfico de probabilidad-probabilidad tipo Weibull de la (a) longitud y ancho de las virutas metálicas, y (b) longitud y diámetro de las fibras metálicas.

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., 2017a) 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 7 y Figura 8.

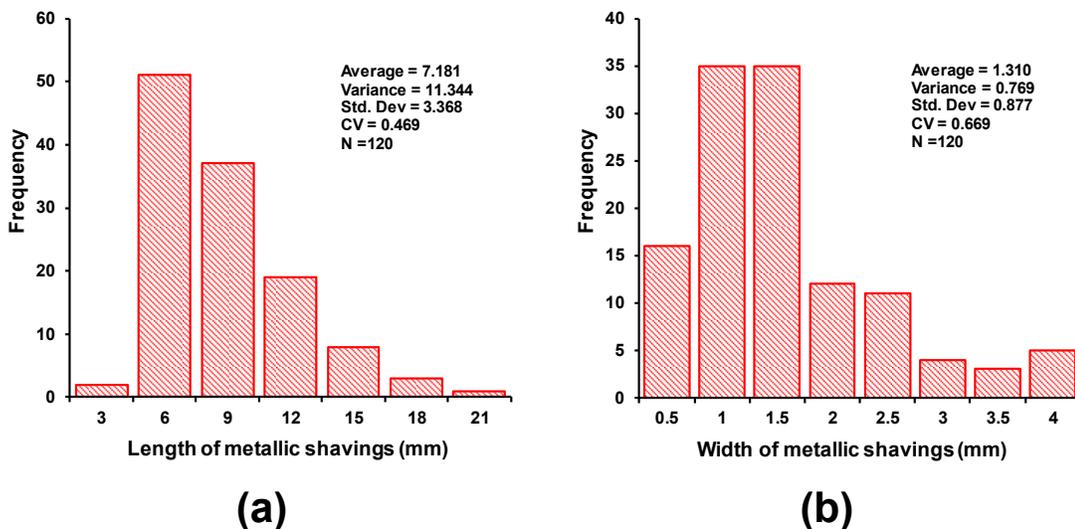


Figura 7. Histograma de frecuencia basado en la función de probabilidad tipo Weibull para la (a) longitud y (b) ancho de las virutas.

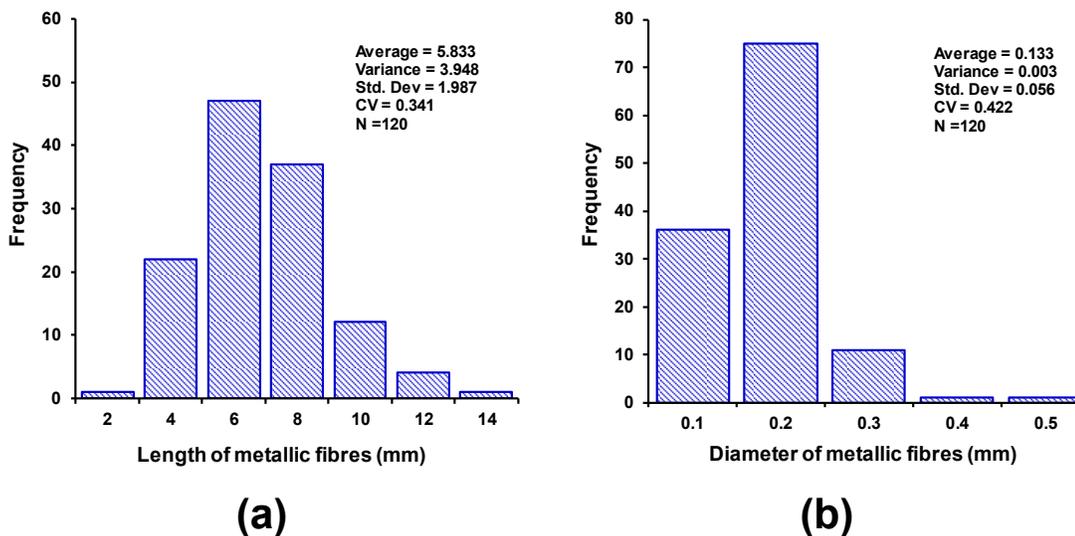


Figura 8. Histograma de frecuencia basado en la función de probabilidad tipo Weibull para la (a) longitud y (b) diámetro de las fibras.

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 7(a) y Figura 8(a), respectivamente. Asimismo, se demostró que el ancho de las virutas metálicas es 10 veces mayor que el diámetro de las fibras, ver Figura 7(b) y Figura 8(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 mostrada en la Figura 7, además de su longitud y ancho promedio.

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

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. 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 7, lo que demuestra que independiente de la cantidad de virutas añadidas a la mezcla, existe un 88% de probabilidad de que las virutas sean largas, entre 6 y 12mm (ver la Figura 7(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 7(b)). Por otro lado, a partir de la Figura 8, 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 8(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 8(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.

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

En la Figura 9 se muestran los resultados promedios de las densidades aparentes (Figura 9(a)) y porosidades (Figura 9(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 esta Figura corresponden a una desviación estándar. A partir de la Figura 9(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 1.705 g/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 son: 1.644 y 1.666 g/cm³ para morteros con virutas, y 1.704 y 1.683 g/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.

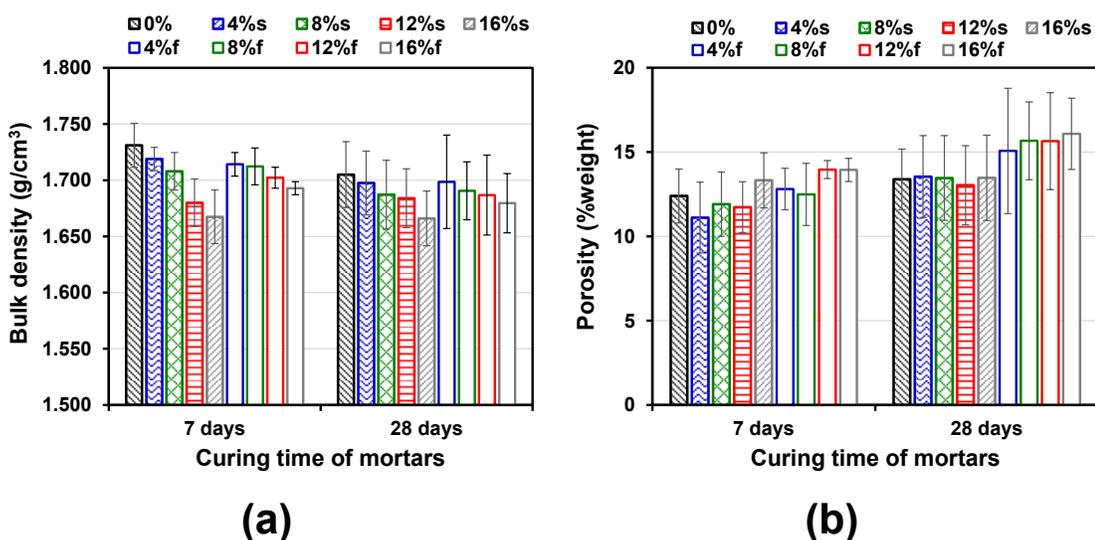


Figura 9. Relación entre la (a) densidad aparente y la (b) porosidad de las muestras para diferentes contenidos de residuos metálicos y tiempos de curado.

Adicionalmente, en este estudio se comprobó que la densidad aparente de los morteros se vio afectada producto de la porosidad, ver Figura 10. 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 para un mismo valor de porosidad en general 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 9(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.

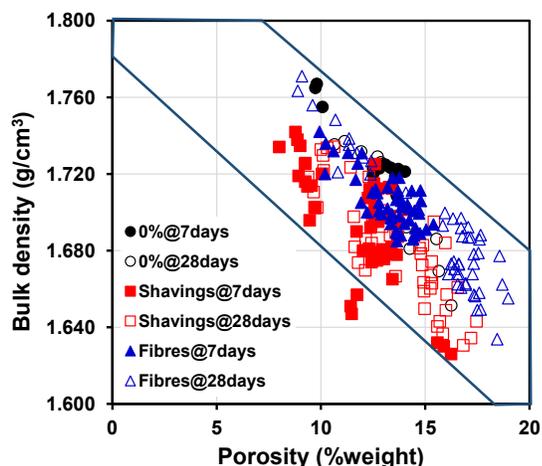


Figura 10. Resultados de la densidad aparente en función de la porosidad, medidas en las muestras de mortero.

Por otro lado, en la Figura 9(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, pudo observarse que los menores valores de porosidad se registraron en los morteros de referencia (sin residuos metálicos). Esto ocurre 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 Análisis de la distribución de los residuos metálicos al interior de los morteros.

La Figura 11 muestra los resultados de los tiempos ultrasónicos promedio obtenidos para morteros con y sin residuos metálicos evaluados en este estudio. Estos tiempos ultrasónicos pueden ser interpretados como una forma de representar cualitativamente la distribución de residuos metálicos en el interior de los morteros.

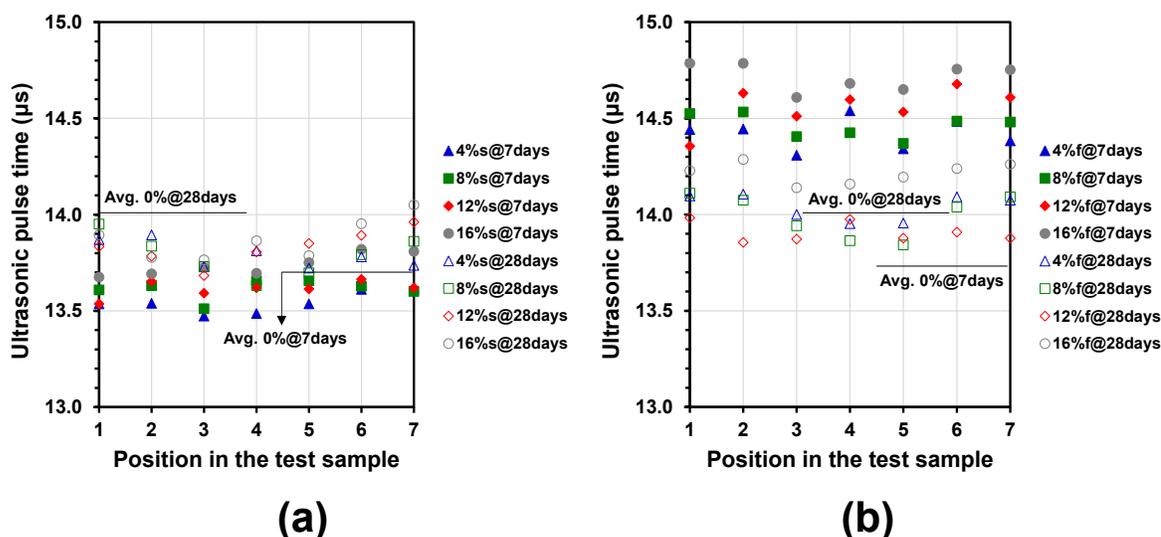


Figura 11. Relación entre el tiempo ultrasónico promedio y la posición correspondiente en cada muestra de ensayo: reforzadas con (a) virutas de acero y (b) fibras de lana de acero.

En general, en la Figura 11 se observa que los tiempos promedios de las muestras con virutas independientes de la posición (1-7), resultaron menores en comparación a los tiempos promedios de las fibras. Esta diferencia puede ser observada de forma más clara en la Figura 12(a), en esta figura se representan los promedios de los tiempos ultrasónicos medidos en las muestras independiente de la posición y las barras de error corresponden a una desviación estándar. Por otra parte, se observó que los resultados de tiempos promedios para muestras con fibras presentaron valores más dispersos en comparación a las con virutas. Así mismo, en la Figura 11 los valores más altos de tiempo ultrasónico se presentaron en las posiciones extremas de las muestras de ensayo (ver 1 y 7), mientras que valores más bajos de tiempos ultrasónicos fueron medidos en las posiciones centrales de las muestras (ver 3-5) independiente del tipo, contenido y edad de curado. Estos valores de tiempos más bajos, pueden ser un indicador de mayor presencia y conectividad de los residuos en esa zona de las probetas. Una hipótesis para dar respuesta a este comportamiento podría ser la condición de contorno y su influencia durante el mezclado y la compactación de las materias primas. En donde el proceso de vibración necesario para la compactación, hace que los residuos que son más densos que la matriz de mortero tiendan a acumularse en el centro del molde.

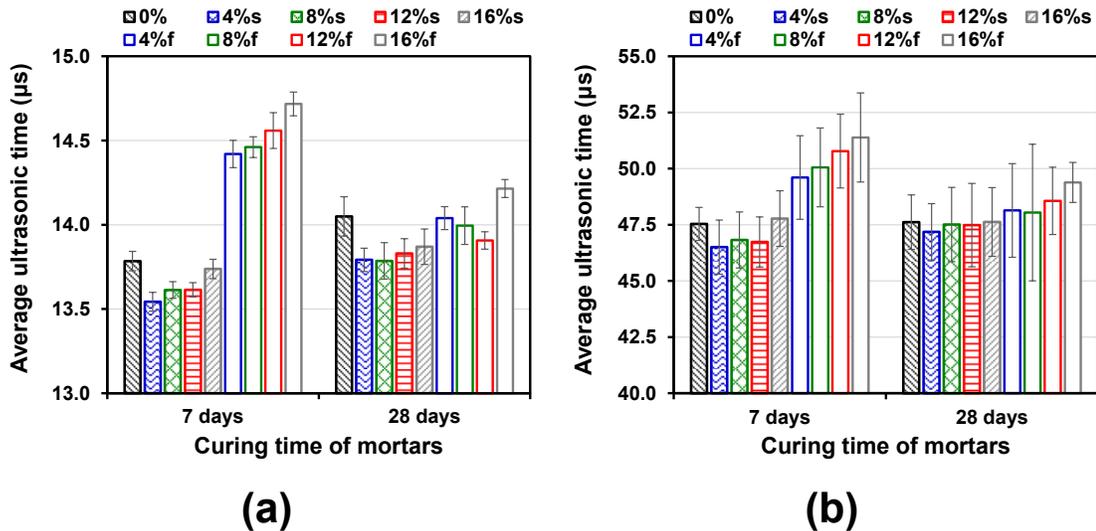


Figura 12. Relación entre (a) el tiempo ultrasónico promedio y (b) tiempo ultrasónico a través de la longitud de las muestras con distinto tipo y contenido de residuos metálicos evaluadas para diferentes edades de curado.

Así también, para las muestras con virutas (ver Figura 11(a)), se ha obtenido que los tiempos ultrasónicos aumentaron con la cantidad de virutas y la edad de curado. Por ejemplo, el mayor tiempo ultrasónico promedio (14.05 µs) correspondió a la muestra reforzada con un 16% de virutas para una edad de 28 días. En general para las virutas, muestras a 28 días han presentado valores de tiempos promedios más altos que muestras a 7 días, esto podría deberse a los valores más altos de

porosidad para 28 días (ver Figura 9(a)), aumentando así la cantidad de vacíos en el interior de los morteros y con ello la propagación del pulso ultrasónico. De este modo, con base en la variabilidad de los resultados presentados en la Figura 9(a), la influencia de la porosidad puede ser no significativa en la medida del tiempo ultrasónico. Por otra parte, los valores más bajos de pulso ultrasónico en virutas podría ser debido a dos características de las virutas: la densidad y la trituración que experimentan. La densidad de las virutas es un 10% mayor respecto de las fibras, debido a que contienen un mayor porcentaje de Fe como elemento constituyente (ver Tabla 2). Además, las virutas pueden ser trituradas durante el mezclado y distribuirse adecuadamente en la matriz, permitiendo al pulso ultrasónico propagarse en menos tiempo. Por otra parte, se observa que en general, las muestras con fibras tienen valores promedio de ultrasonido mayores que una muestra de referencia (tiempo promedio de 13.8 μ s), independiente del contenido de fibras y la edad de curado, ver Figura 12(a). Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la Sección 3.2, donde muestras con fibras presentaron una mayor porosidad que la referencia, lo que evidencia un mayor contenido de vacíos y a su vez un mayor tiempo de pulso ultrasónico en las muestras con fibras. Sin embargo este aumento no se ve reflejado en los tiempos ultrasónicos, considerando que a los 28 días se presentaron mayores valores de porosidad, ver Figura 9(b). Entonces, pese a que existe una mayor porosidad a los 28 días, el tiempo de propagación no aumentó en la misma proporción que la porosidad, posiblemente debido a que los poros, antes ocupados por aire, ahora sean ocupados por agua. Por otro lado, en la Figura 12(b) se muestra el tiempo ultrasónico medido en los extremos de la muestra (ver Figura 3(a)). Las barras de error en la Figura 12(b) corresponden a una desviación estándar. En esta Figura los resultados promedio observados en los extremos de las muestras presentan un resultado similar a lo medido a través del ancho de las muestras (Figura 12(a)), así los mayores tiempos ultrasónicos se presentan en muestras con fibras para la edad de 7 días, y estos disminuyen para la edad de 28 días. Sin embargo, en base a la baja diferencia entre los resultados, la influencia del tiempo de curado puede ser no significativa. En resumen, las muestras con fibras presentaron mayores valores de tiempo de propagación por ultrasonido que las muestras reforzadas con virutas, y en general el tiempo ultrasónico aumentó con el porcentaje de residuos adicionados, tanto para 7 como para 28 días. De este modo el análisis de la distribución de los residuos metálicos en el interior de las muestras usando ultrasonido, puede ser utilizado para muestras reforzadas con fibras para edades de curado bajas. Así mismo esta metodología no se recomienda para muestras reforzadas con virutas puesto que se comportaron como un mortero sin residuos, imposibilitando el distinguir de la presencia de residuos.

3.4 Influencia de los residuos metálicos en las propiedades eléctricas y térmicas.

En la Figura 13 se muestran los resultados promedio de las mediciones de resistividad eléctrica comparados con el contenido de virutas y fibras. Estos resultados han sido presentados en una gráfica semi-logarítmica, en estas figuras los puntos representan la dispersión de los valores obtenidos para cada contenido. Así mismo las líneas grafican los valores promedio para cada edad de curado.

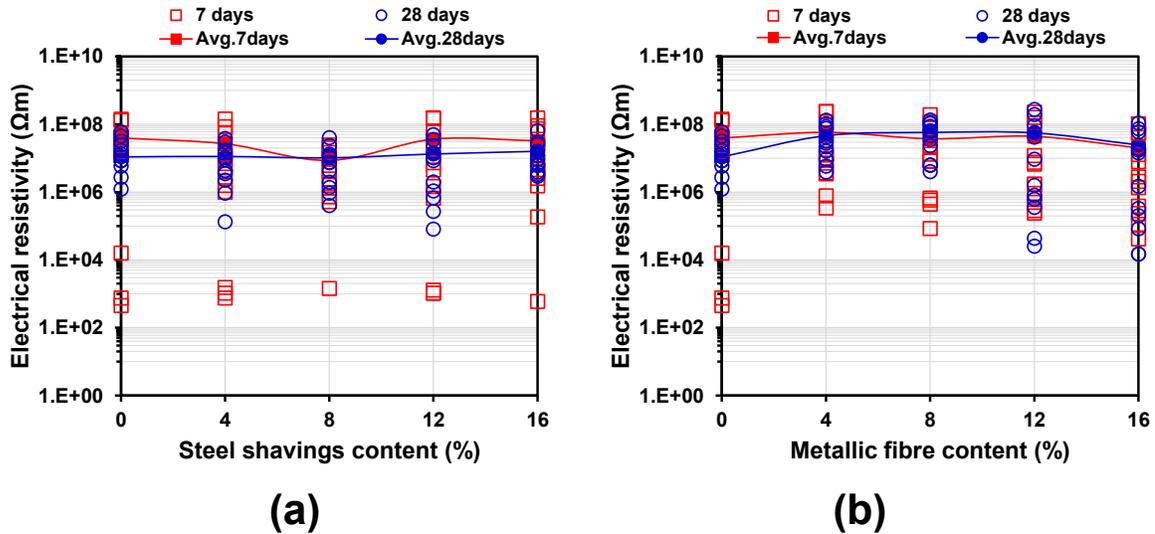


Figura 13. Relación entre la resistividad eléctrica y el contenido de residuos metálicos: (a) probetas con virutas y (b) probetas con fibras.

En general se observa que los valores de resistividad eléctrica fueron similares independiente el tipo, contenido y edad de curado. Por ejemplo, en la Figura 13(a) para muestras con un 8% de virutas se registró un valor de 8.64×10^6 y $1.03 \times 10^7 \Omega m$ para las edades de 7 y 28 días, lo cual equivale a una variación de 0.15. Un comportamiento similar ocurrió con las muestras reforzadas con fibras, donde por ejemplo para un 16% de contenido (ver Figura 13(b)) se registraron valores de 2.02×10^7 y $2.46 \times 10^7 \Omega m$ para las edades de 7 y 28 días, significando una variación de 0.17. Así, tanto en virutas como en fibras los valores de resistividad eléctrica se encuentran en un rango muy parecido, demostrando que en este estudio la edad de curado no tuvo una influencia significativa. Sin embargo, durante las mediciones se registró que la resistividad eléctrica en general, disminuye cuando incrementa el contenido de residuos, de esta forma es posible observar en la Figura 13 que las probetas de referencia (0% de contenido) tienen un valor mayor de resistividad que las muestras con residuos, independiente del tipo. Además de este análisis se concluye que virutas y fibras han disminuido la resistividad y aumentado la conductividad eléctrica en un orden de magnitud similar, a pesar que su composición y características morfológicas son diferentes (ver Sección 2.1 y 2.4).

Con objeto de explicar este comportamiento la Figura 14 muestra una idealización de la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos en el interior de los morteros durante un ensayo de resistividad eléctrica, en esta figura es posible apreciar que las fibras son más largas que las virutas y pueden formar agrupaciones (ver Figura 14(b)), mientras que las virutas son más cortas y se distribuyen libremente en la matriz de mortero. Por estas razones se puede concluir que las fibras compensan su baja conductividad (25% menos que las virutas) debido a que son capaces de conectarse, mientras que las virutas no se conectan.

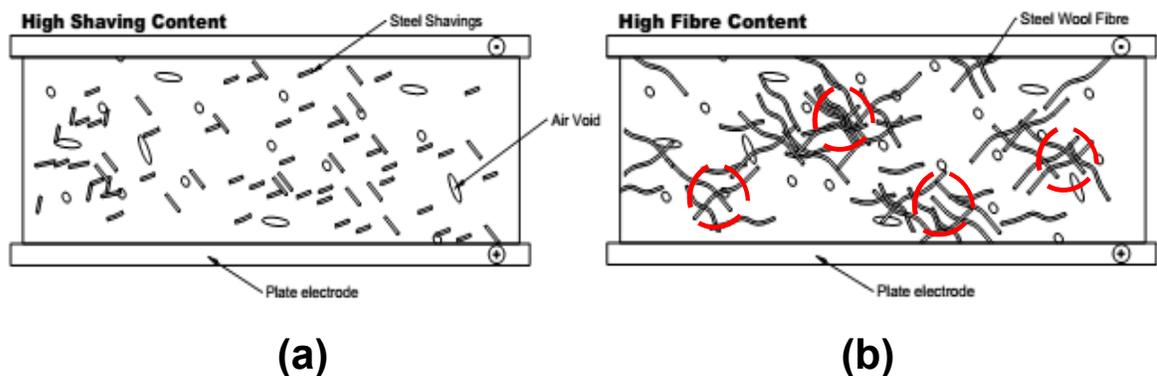


Figura 14. Influencia del tipo y contenido de residuos metálicos en el interior de los morteros: (a) alto contenido de virutas y (d) alto contenido de fibras. Figura basada en Wang H. et al., 2016.

Por otra parte en el caso de las fibras, los resultados indican que existe una variación significativa de resistividad eléctrica entre los porcentajes 12 y 16% con valores 4.42×10^7 y $3.76 \times 10^6 \Omega m$, respectivamente. Sin embargo, estos valores no presentan una la ley de percolación, ya que los contenidos de residuos no han provocado un punto de percolación (Xie et al., 1996), para ambos residuos utilizados. Una hipótesis para dar respuesta a este fenómeno es la mínima capacidad de los residuos para formar canales conductores en el interior de los morteros (ver Figura 14), este comportamiento ha sido contrario a lo observado en otras investigaciones realizadas en materiales compuestos, como en mezclas asfálticas reforzadas con fibras (Norambuena-Contreras et al., 2017b), donde se han observado puntos de percolación y las fibras tuvieron la capacidad de entrelazarse. En resumen, en los morteros si bien existen acumulaciones de fibras estas no se conectan para formar canales, concluyendo que las fibras no presentan un comportamiento eléctricamente conductor.

Por otra parte, la Figura 15 muestra los resultados promedios de las mediciones de conductividad térmica comparados con el contenido de virutas y fibras. En estas figuras los puntos representan la dispersión de los valores obtenidos para cada contenido, así mismo las líneas grafican los valores promedio para cada edad de curado. Los resultados de la Figura 15(a) indican que en general las

probetas de referencia (conductividad térmica promedio de 0.868 y 0.796 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para edad de 7 y 28 días) presentan una conductividad térmica menor que las muestras con virutas (conductividad térmica promedio de 0.917 y 0.782 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para edad de 7 y 28 días). Por lo tanto, la incorporación de virutas aumenta la conductividad térmica, independiente la edad de curado.

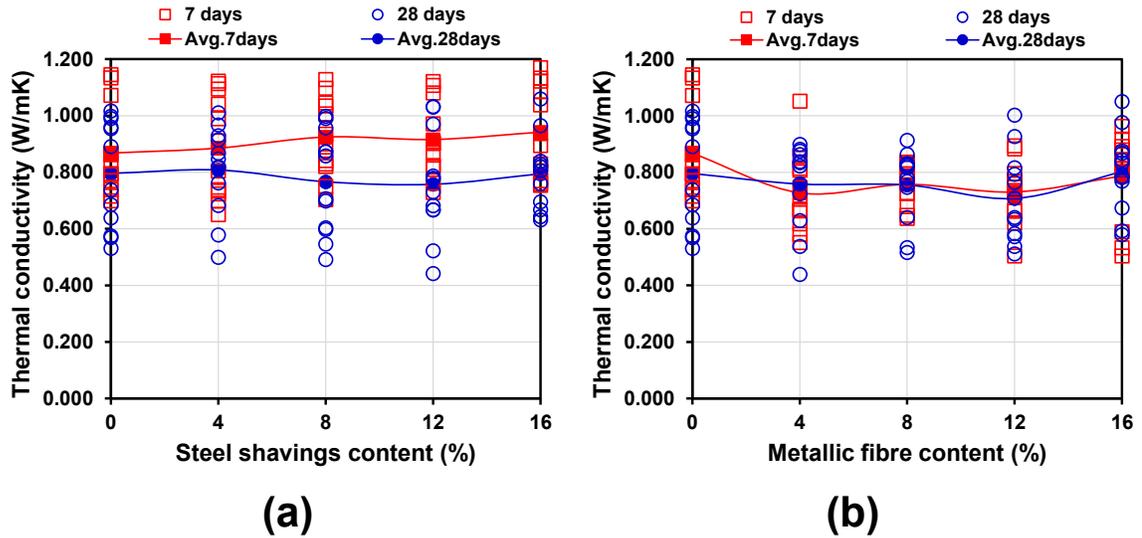


Figura 15. Relación entre la conductividad térmica y contenido de residuos metálicos: (a) probetas con virutas y (b) probetas con fibras.

Este comportamiento es diferente en muestras reforzadas con fibras (ver Figura 15(b)), donde el valor más alto de conductividad térmica se registró en la probeta de referencia, esto significa que la incorporación de fibras metálicas disminuye la conductividad térmica, independiente del tiempo de curado. De esta forma debido a los resultados obtenidos a partir de la Figura 15, se concluye que el tiempo de curado no presenta una influencia significativa sobre la conductividad térmica evaluada. Por otra parte, comparando el comportamiento de fibras y virutas se observa que las fibras metálicas provocaron una disminución en los valores promedio de conductividad térmica. De este modo la adición de fibras de lana de acero no necesariamente incrementa la capacidad de conducir el calor de los morteros cementicios. Este resultado pudo deberse a que las fibras son 10% menos densas que las virutas y presentan un mayor contenido de Fe (ver Tabla 2), lo que hace a las fibras mejores almacenadoras del calor, pero no necesariamente capaces de conducirlo a través del mortero. Además la porosidad influye respecto del valor de conductividad térmica, como se observa en la Figura 16, puesto que mientras mayor es la porosidad menor es el valor de conductividad térmica. Esta relación se produce en muestras con fibras, donde debido a las

agrupaciones de fibras que se forman (ver Figura 14(b)), se almacena aire en su interior, aumentando la porosidad de los morteros y reduciendo a su vez la conducción del calor.

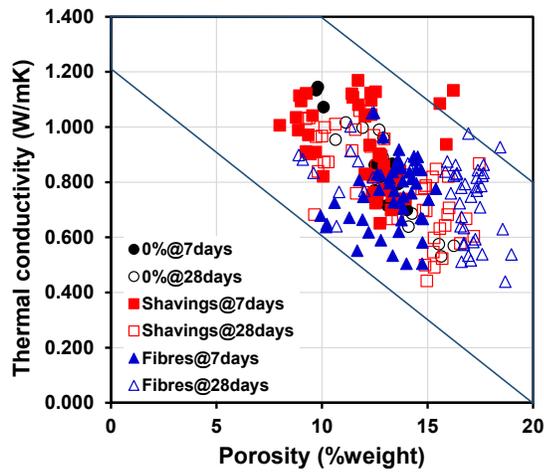


Figura 16. Relación entre la conductividad térmica y la porosidad de los morteros.

En resumen, se observó que el contenido de residuos metálicos no presenta una influencia en la medida de la resistividad eléctrica o conductividad térmica de los morteros. Con el objetivo de evaluar la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos sobre la resistividad eléctrica y la conductividad térmica, se ha definido un ratio de evaluación para cada variable medida, ver ecuación (6). Este ratio ha sido definido como el cociente entre la resistividad eléctrica o la conductividad térmica para las muestras con residuos metálicos ($V_i - with RMW$) y morteros sin residuos metálicos ($V_i - without RMW$), evaluadas para una misma edad de curado.

$$Ratio = \frac{V_i - with RMW}{V_i - without RMW} \quad (6)$$

Donde V_i corresponde al valor de resistividad eléctrica (V_{ER}) o conductividad térmica (V_{TC}) para cada edad de curado.

La Figura 17 muestra las gráficas de todos los valores de ratio de las muestras ensayadas, graficados usando una distribución de probabilidad tipo Weibull. Estos valores han sido graficados independiente del tipo de residuo, cantidad y edad de curado.

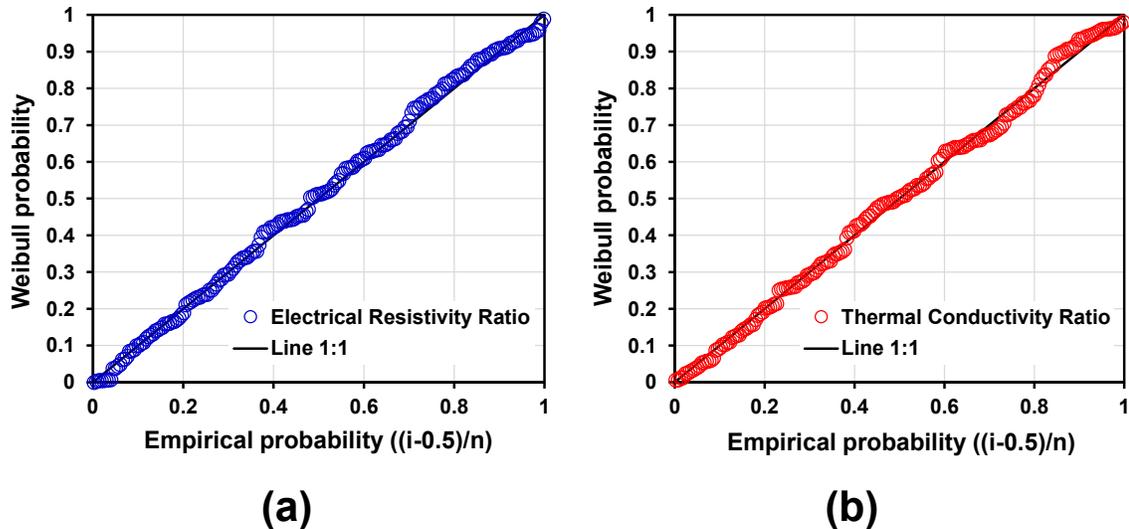


Figura 17. Gráfico de probabilidad-probabilidad tipo Weibull para datos de (a) resistividad eléctrica y (b) conductividad térmica.

En estas Figuras, se observa que todos los resultados pueden ser alineados a una recta 1:1, que indica que el tipo y cantidad de residuo así como la edad de curado utilizado en esta investigación, no presentaron un efecto significativo en la variación de la conductividad eléctrica y térmica de los morteros medidos en condiciones experimentales. Finalmente, la función de probabilidad tipo Weibull ha sido usada en este estudio, considerando que el valor de la resistividad eléctrica y conductividad térmica de los morteros evaluados, es resultado de la naturaleza aleatoria de los contactos entre las virutas y las fibras en el interior de las muestras, resultado de los procesos de mezclado y vibrado (Sevkat et al., 2008).

4 CONCLUSIONES

En esta Tesis se ha evaluado la influencia del tipo y contenido de dos diferentes residuos metálicos (fibras y virutas) sobre las propiedades eléctricas y térmicas de los morteros cementicios. Para ello, se han estudiado en laboratorio nueve mezclas de mortero empleando la misma relación agua/cemento/árido (0.5/1/2), pero cambiando el tipo y la cantidad de residuos metálicos incorporados. En total, se utilizaron cuatro porcentajes diferentes de virutas o fibras en los morteros respecto al peso de cemento: 4%, 8%, 12% y 16%. Para ello se determinó la densidad aparente y la porosidad de los morteros resultantes. Además, se midió el tiempo requerido por un pulso

ultrasónico para recorrer la probeta en diferentes puntos de la misma para determinar la distribución de residuos. Finalmente se determinó la resistividad eléctrica y conductividad térmica de todas las probetas fabricadas. De este modo, con base en el análisis de resultados, se obtuvieron 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 rugoso y una geometría mucho más variable e irregular que las fibras de lana de acero, las cuales presentan 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 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.
- Adicionalmente, los morteros con fibras presentaron una mayor porosidad respecto a los morteros con virutas. Esto ocurrió debido a la mayor formación de agrupaciones de fibras de lana de acero (clusters) en el interior de los morteros, facilitado por su mayor esbeltez y maleabilidad. Además, se concluyó que la edad de curado no tuvo una influencia significativa sobre la porosidad y densidad aparente de las muestras.
- La distribución de los residuos metálicos evaluada a través del pulso ultrasónico ha mostrado que la distribución de residuos metálicos no es uniforme en toda la probeta, registrándose valores más bajos de pulso ultrasónico en las posiciones centrales de las muestras. Al comparar ambos tipos de residuos, las muestras con fibras presentaron mayores valores de tiempo ultrasónico que las muestras con virutas. Durante el proceso de fabricación, las fibras de lana de acero, más esbeltas y maleables que las virutas posibilitaron la formación de agrupaciones en el interior de las muestras, dificultando la penetración de la matriz de mortero en su interior y generando una mayor porosidad. Sin embargo, las virutas, más gruesas y frágiles presentaron una tendencia a la trituración que facilitó su distribución en la matriz de mortero. Se ha comprobado entonces, que la variación de los tiempos ultrasónicos depende principalmente de la distribución de los residuos metálicos.
- Además en este estudio, se comprobó que la resistividad eléctrica de las muestras disminuyó con la incorporación de residuos metálicos, presentando valores de resistividad eléctrica en

órdenes de magnitud similar independiente del tipo, contenido de residuos y edad de curado. Esto se debió a la morfología y distribución de fibras y virutas en el interior de los morteros.

- Por otra parte, se registró un aumento en la conductividad térmica para morteros con virutas y una disminución en morteros con fibras, aunque no se manera significativa. Para las proporciones de residuos metálicos estudiadas, el aumento de conductividad térmica esperado debido a la presencia de las fibras o las virutas se ve contrarrestado con la disminución que supone la mayor presencia de aire o mayor porosidad en el mortero.
- Finalmente, mediante un análisis de probabilidad se confirmó que el tipo y contenido de residuos metálicos así como la edad de curado utilizados en esta investigación, no presentaron una influencia significativa en la variación de las propiedades eléctricas y térmicas de los morteros cementicios evaluados.

5 REFERENCIAS

ASTM C595/C595M-16. Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. 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.

ASTM D 5334. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. American Society for Testing and Materials, 2008.

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.

Banthia, N., Djeridane, S. & Pigeon, M. 1992, Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements.

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. Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement (2002) *Cement and Concrete Research*, 32 (10), pp. 1657-1661.

Çavdar, A. Investigation of freeze-thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars (2014) *Composites Part B: Engineering*, 58, pp. 463-472.

Corinaldesi, V., Mazzoli, A. & Moriconi, G. 2011, "Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles", *Materials and Design*, vol. 32, no. 3, pp. 1646-1650.

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 MN, Schuetz P. Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. *Constr Build Mater* 2013; 43:107-117.

Girardi, F., Giannuzzi, G.M., Mazzei, D., Salomoni, V., Majorana, C. & Di Maggio, R. 2017, Recycled additions for improving the thermal conductivity of concrete in preparing energy storage systems, *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 565-579.

Khaliq, W. & Kodur, V. 2011, "Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures", *Cement and Concrete Research*, vol. 41(11), 1112-1122.

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.

Lataste, J. F., Behloul, M., & Breyse, D. (2008). Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *NDT & E International*, 41(8), 638-647.

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.

Mindess, S.; Young, J. F.; Darwin, D. *Concrete* (2nd Ed.); Prentice Hall; 2002.

Nagy, B., Nehme, S. G., & Szagri, D. (2015). Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes. *Energy Procedia*, 78, 2742-2747

Norambuena-Contreras J, Castro-Fresno D, Vega-Zamanillo A, Celaya M, Lombillo-Vozmediano I. Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. *NDT&E International* 2010; 43:629-634.

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.* 2015; 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.

Norambuena-Contreras J, Silva-Robles E, Gonzalez-Torre I, Saravia-Montero Y. (2017a) 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, Alvarado M, Concha JL, Gonzalez-Torre I. (2017b). Influence of the type and amount of metallic waste on the electrical and thermophysical properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials* (under review).

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, 25(2), 575-581.

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.

Sevkat, E., Li, J., Liaw, B., & Delale, F. (2008). A statistical model of electrical resistance of carbon fiber reinforced composites under tensile loading. *Composites Science and Technology*, 68(10), 2214-2219.

Solgaard, A.O.S., Geiker, M., Edvardsen, C. & Küter, A. 2014, "Observations on the electrical resistivity of steel fibre reinforced concrete", *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 47, no. 1-2, pp. 335-350.

Wang H, Yang J, Liao H, Chen X. (2016). Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*; 122:184-190.

Wang Z., Dai Q., Porter D., You Z. Investigation of microwave healing performance of electrically conductive carbon fiber modified asphalt mixture beams. *Construction and Building Materials* 2016; 126: 1012-1019.

Xie, P., Gu, P. & Beaudoin, J.J. 1996, Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres, *Journal of Materials Science*, vol. 31, no. 15, pp. 4093-4097.

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.