

Luis Alberto Tacca Villalva , Tacca Villalva- Pilco Si...

Efecto de la Incorporación de Limaduras de Hierro en las Propiedades Mecánicas del Concreto Simple,

 My Files My Files Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:474198064

Fecha de entrega

16 jul 2025, 6:48 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

16 jul 2025, 7:46 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

CRAI_Articulo_Yang_v2 (1).pdf

Tamaño de archivo

6.4 MB

33 Páginas

8646 Palabras

40.218 Caracteres

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 11%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 9% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 11% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	hdl.handle.net	2%
2	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
3	Internet	www.coursehero.com	<1%
4	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2024-04-12	<1%
5	Trabajos entregados	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2025-07-07	<1%
6	Trabajos entregados	Universidad Ricardo Palma on 2020-12-17	<1%
7	Trabajos entregados	Universidad Privada del Norte on 2024-06-30	<1%
8	Internet	repositorio.urp.edu.pe	<1%
9	Internet	docplayer.es	<1%
10	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2022-07-25	<1%
11	Trabajos entregados	University of Hull on 2011-04-26	<1%

12	Trabajos entregados	West Liberty University on 2021-03-26	<1%
13	Trabajos entregados	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2023-08-16	<1%
14	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2017-08-24	<1%
15	Trabajos entregados	Universidad Católica San Pablo on 2023-06-16	<1%
16	Internet	repositorio.unsch.edu.pe	<1%
17	Trabajos entregados	Universidad Señor de Sipan on 2021-12-04	<1%
18	Trabajos entregados	Universidad Católica San Pablo on 2025-07-10	<1%
19	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2023-06-30	<1%
20	Trabajos entregados	Universidad Ricardo Palma on 2019-10-22	<1%
21	Internet	www.slideshare.net	<1%
22	Internet	eprints.uanl.mx	<1%
23	Trabajos entregados	Universidad Continental on 2016-11-16	<1%
24	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2023-02-16	<1%
25	Internet	www.mdpi.com	<1%

26	Trabajos entregados	Universidad Católica de Santa María on 2017-09-20	<1%
27	Internet	doczz.es	<1%
28	Internet	www.unavarra.es	<1%
29	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2019-11-28	<1%
30	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2025-06-02	<1%
31	Trabajos entregados	Universidad Católica de Santa María on 2019-09-12	<1%
32	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2024-07-22	<1%
33	Internet	repositorio.upeu.edu.pe	<1%
34	Internet	repositorio.usil.edu.pe	<1%
35	Trabajos entregados	Universidad Católica Boliviana "San Pablo" on 2024-11-04	<1%
36	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2023-01-27	<1%
37	Internet	jurnalmahasiswa.unesa.ac.id	<1%
38	Internet	repositorioacademico.upc.edu.pe	<1%
39	Internet	www.researchgate.net	<1%

40	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2018-05-02	<1%
41	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2025-05-25	<1%
42	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2023-12-27	<1%
43	Trabajos entregados	Universidad San Ignacio de Loyola on 2018-11-19	<1%
44	Internet	es.slideshare.net	<1%
45	Internet	qdoc.tips	<1%
46	Internet	revistaschilenas.uchile.cl	<1%
47	Trabajos entregados	uncedu on 2024-02-02	<1%
48	Publicación	Harrison de la Rosa Ramírez. "Desarrollo de formulaciones de ácido poliláctico (P...	<1%
49	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2022-12-19	<1%
50	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2024-12-06	<1%
51	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2025-07-08	<1%
52	Trabajos entregados	Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD on 2021-12-09	<1%
53	Trabajos entregados	Webster University on 2022-11-14	<1%

54	Internet	docs.di.fc.ul.pt	<1%
55	Internet	dspace.unitru.edu.pe	<1%
56	Internet	es.scribd.com	<1%
57	Internet	etech.sc.senai.br	<1%
58	Internet	jvcp.iaut.ac.ir	<1%
59	Internet	repositorio.unap.edu.pe	<1%
60	Internet	revistaevsos.com	<1%
61	Trabajos entregados	uncedu on 2025-07-04	<1%
62	Internet	www.bbvaresearch.com	<1%
63	Internet	www.scielo.cl	<1%
64	Internet	www.science.gov	<1%
65	Internet	www.theibfr.com	<1%
66	Publicación	International Commission on Large Dams. "Twenty-Eighth International Congres...	<1%
67	Publicación	Tipula Quiroz, Yadina. "Estilos de socialización parental y la inteligencia emociona...	<1%

68	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2017-12-01	<1%
69	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2018-06-01	<1%
70	Trabajos entregados	Universidad Católica de Santa María on 2019-12-18	<1%
71	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2024-07-10	<1%
72	Trabajos entregados	Universidad Ricardo Palma on 2018-11-07	<1%

Efecto de la Incorporación de Limaduras de Hierro en las Propiedades Mecánicas del Concreto Simple, Juliaca

RESUMEN

El concreto enfrenta el desafío de mejorar su desempeño mecánico sin aumentar su impacto ambiental, mitigando el uso intensivo de agregados convencionales mediante la incorporación de residuos industriales; en este sentido, el presente estudio evaluó su desempeño sustituyendo el agregado fino con limaduras de hierro (LH) en proporciones del 4%, 8%, 12% y 16%, considerando tres distintas proporciones agua-cemento (0.4, 0.5 y 0.6), empleando como agregado canto rodado de la cantera de Unocolla, distrito de Juliaca. Se efectuaron pruebas en laboratorio para analizar los agregados y determinar tanto la trabajabilidad (slump) como las resistencias a la compresión y a la flexión del concreto, validando posteriormente la significancia de las varianzas de las medias mediante un análisis estadístico ANOVA; los resultados mostraron un incremento del slump del 82.65% en la mezcla con 16% de LH y una proporción agua/cemento de 0.6, respecto a la compresión, se obtuvo como valor máximo de resistencia fue con un 12% de LH, alcanzando valores de 202.80 kg/cm², 304.63 kg/cm² y 359.87 kg/cm² para las tres proporciones agua/cemento evaluadas, observándose que para las mezclas con 4%, 8% y 16% de LH, la resistencia disminuyó en 14.55%, 14.14% y 5.21%, respectivamente. En cuanto a la resistencia a la flexión, esta disminuyó para proporciones agua/cemento de 0.50 y 0.60 hasta un 25.61% con un 4% de LH, mientras que para la proporción 0.40 no se observaron variaciones significativas, aunque logró un aumento del 15.84% con un 12% de LH, respaldando así estudios previos que evidencian mejoras en la trabajabilidad y resistencia a la compresión con el uso de LH; finalmente, el reemplazo óptimo determinado fue del 12%, ya que optimiza la trabajabilidad con una proporción agua-cemento de 0.6 y aumenta en promedio un 16.66% la resistencia a la compresión.

Palabras clave: Concreto Simple; Limaduras de Hierro (LH); Resistencia a la compresión; Resistencia a la Flexión.

Effect of the Incorporation of Iron Filings on the Mechanical Properties of Plain Concrete, Juliaca

ABSTRACT

Concrete faces the challenge of improving its mechanical performance without increasing its environmental impact, mitigating the intensive use of conventional aggregates through the incorporation of industrial waste; in this sense, the present study evaluated its performance by replacing the fine aggregate with iron filings (IF) in proportions of 4%, 8%, 12% and 16%, considering three different water-cement ratios (0.4, 0.5 and 0.6), using as aggregate rounded stones from the Unocolla quarry, Juliaca district. Laboratory tests were carried out to analyze the aggregates and determine both the workability (slump) and the compressive and flexural strengths of the concrete, subsequently validating the significance of the variances of the means through an ANOVA statistical analysis. The results showed an increase in slump of 82.65% in the mixture with 16% LH and a water/cement ratio of 0.6, with respect to compression, the maximum resistance value was obtained with 12% LH, reaching values of 202.80 kg/cm², 304.63 kg/cm² and 359.87 kg/cm² for the three water/cement ratios evaluated, observing that for the mixtures with 4%, 8% and 16% LH, the resistance decreased by 14.55%, 14.14% and 5.21%, respectively. In terms of flexural strength, it decreased for water/cement ratios of 0.50 and 0.60 to 25.61% with 4% LH, while for the 0.40 ratio no significant variations were observed, although it achieved an increase of 15.84% with 12% LH, thus supporting previous studies that show improvements in workability and compressive strength with the use of LH; finally, the optimal replacement determined was 12%, since it optimizes workability with a water-cement ratio of 0.6 and increases compressive strength by an average of 16.66%.

Keywords: Plain Concrete; Iron Filings (LH); Compressive Strength; Flexural Strength.

1. INTRODUCCIÓN

Con la constante evolución de la tecnología de materiales se ha demostrado la necesidad de requerir que estos tengan nuevas propiedades favorables en su desempeño, tal es el caso del concreto, que a través de los años se han realizado distintas investigaciones buscando mejorar la sostenibilidad y las propiedades mecánicas del concreto al incorporar materiales reciclables en su fabricación. El Banco Central de Reserva del Perú BCRP (2024) indica que el sector de la construcción mostró un aumento significativo para octubre del 2024, la actividad del sector creció un 4,9% respecto al mismo mes del año previo, gracias al avance de proyectos tanto públicos como privados. Haciendo evidente la búsqueda la fabricación de concreto sostenible con el uso de materiales y prácticas que minimizan el impacto ambiental del concreto, como el uso de materiales reutilizables y la disminución de emisiones de CO₂ (Gunasekara et al., 2020).

El efecto de las limaduras en el concreto produce una mejora en la capacidad a la compresión del concreto en comparación con áridos convencionales, llegando hasta un 25% más a los 28 días de curado (Mhawi & Dawood, 2020). Con una incorporación de L.H. de 0.75% sobre el peso de la arena para un concreto elaborado con áridos reciclados se obtuvo una resistencia a compresión 67% mayor en comparación con solo áridos reciclados (Alserai et al., 2018). Esta resistencia mejorada sería por la fricción originada entre las partículas arena, pasta y limaduras de hierro (Yusuf, 2019). Por otro lado existen investigaciones con resultados desfavorables en la mejora de la resistencia como Laurie & Rivero (2021) que hallaron como proporción óptima un 4% L.H., pero que no llega a superar al concreto sin limaduras de hierro.

El uso de L.H. en el concreto ha demostrado influir en sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Estudios indican que una adición del 4% mejora la capacidad a compresión sin afectar la trabajabilidad, mientras que el 8% optimiza la absorción de agua y la durabilidad. Con el 12%, se observa una mejora en la resistencia mecánica, pero con una ligera reducción en la trabajabilidad. Finalmente, el 16% puede generar segregación y disminuir la cohesión de la mezcla, aunque puede ser útil en aplicaciones donde se requiera mayor densidad. La selección de estos porcentajes responde a la necesidad de evaluar la influencia gradual de la incorporación de L.H. en el concreto, identificando el

punto óptimo donde se maximicen sus beneficios sin comprometer su desempeño estructural. Entre los aspectos fundamentales que influyen en su respuesta se encuentran el tamaño de las partículas de L.H. y el porcentaje de sustitución del agregado fino. Por esta razón, la presente investigación propone el uso de limaduras de hierro con un tamaño de partícula menor o igual a 2 mm, seleccionadas mediante un proceso de tamizado con la malla N°10 y un análisis granulométrico conforme a la norma NTP 400.012. En cuanto a la cantidad de material incorporado, se analizó el peso específico de las limaduras de hierro para que el reemplazo del agregado fino se realice de manera equivalente en proporciones del 0 %, 4 %, 8 %, 12 % y 16 %.

Esta investigación tiene como propósito evaluar la capacidad a la compresión, flexión y trabajabilidad del concreto, considerando proporciones de mezcla agua/cemento de 0.4, 0.5 y 0.6. Estos indicadores garantizaran que el efecto producido en el concreto por las limaduras de hierro es igual o superior al concreto convencional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

2.1.1. Cemento Portland tipo IP

Este tipo de cemento compuesto que incluye puzolana, una sustancia de naturaleza silíceo o aluminosa que, en presencia de cal y agua, desarrolla propiedades cementantes mediante reacciones químicas. Este tipo de cemento es conocido por su durabilidad y resistencia a ciertos agentes químicos (Kosmatka et al., 2003).

Se empleó el cemento portland tipo IP que cumple con las normativas NTP 334.090 y ASTM C-595.

Tabla 1. Especificaciones Cemento Portland IP

Ficha Técnica Cemento Portland Tipo IP	
Especificación	Parámetros
Propiedades Químicas	
Oxido de magnesio	1.5 - 3.0 %
Trióxido de Azufre	1.5 - 3.0 %
Perdida de Ignición	1.5 - 4.0 %
Propiedades Físicas	
Densidad	2.7 - 2.8 gr/cm ³
Contracción	-0.09 a 0.05%
Fragua Inicial	140 – 260 min.
Aire contenido	3 a 8 %
Resistencia a los sulfatos	<0.05 %

2.1.2. Agregados

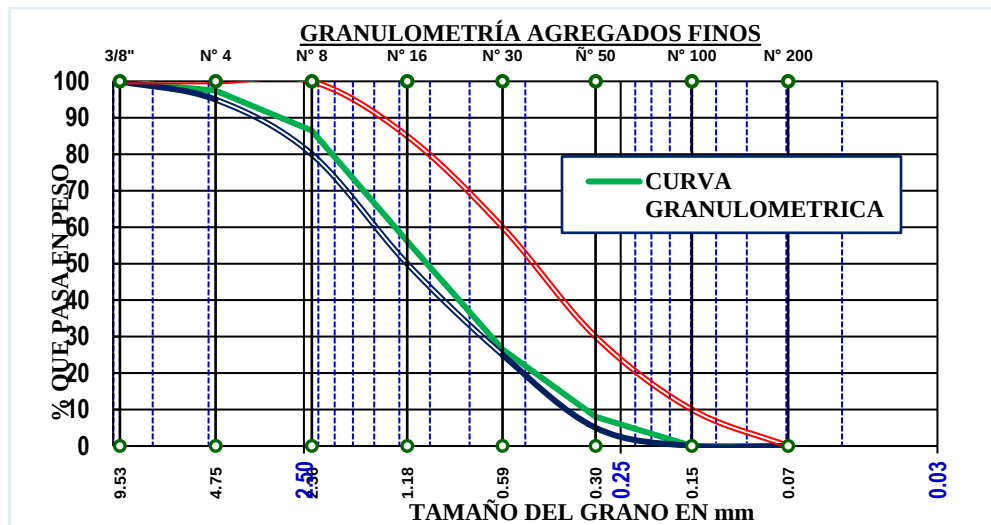
La fuente de agregados es la cantera de Unocolla en la ciudad de Juliaca. Estas tienen un origen natural conocidas como canto rodado, que por su disponibilidad y costos accesibles fueron elegidos para la ejecución de esta investigación.

2.1.2.1. Agregado Fino

El agregado fino en el concreto se compone de partículas inertes, como arena natural o manufacturada, que atraviesan un tamiz de 4,75 mm (malla No. 4) y se retienen en un tamiz de 0,075 mm (malla No. 200). Estos agregados son esenciales en la mezcla de concreto, ya que ocupan los espacios originados por el agregado gruesos, incrementado la manejabilidad de la mezcla y juegan un rol fundamental en las propiedades finales del concreto, tales como la durabilidad y la resistencia mecánica. (Mindess et al., 2003).

Para este estudio las características obtenidas para los agregados fueron de peso específico de 2.46 kg/cm³, se registró un peso unitario de 1656.96 kg/m³ en condición suelta y 1765.76 kg/m³ en estado compactado, módulo de fineza de 3.25 y con la granulometría mostrada a continuación:

Figura 1. Granulometría de agregados finos



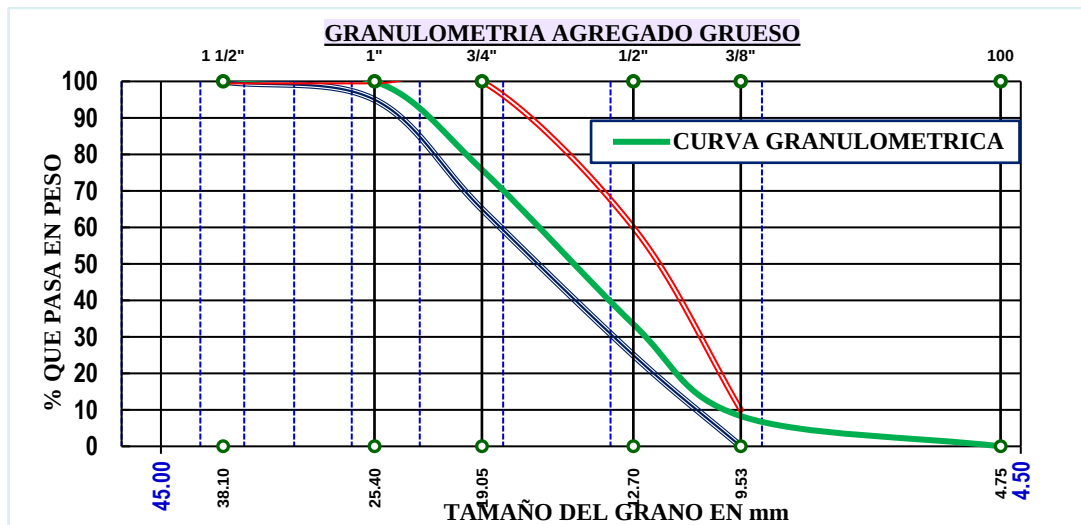
2.1.2.2. Agregado Grueso

Formado por elementos inertes, como fragmentos de roca natural o mecánicamente triturada, que quedan atrapadas en un tamiz de 4,75 mm (malla No. 4). Estos agregados representan la mayor parte del volumen del concreto y son esenciales para darle resistencia y rigidez a la mezcla. Las características como el tamaño, la morfología y superficie de estos agregados afectan directamente las propiedades mecánicas del concreto, incluyendo su durabilidad, capacidad de compresión y su respuesta ante diferentes cargas (Neville, 2011).

Para este estudio las características obtenidas para los agregados fueron de peso específico de 2.21 kg/cm³, se registró un peso unitario de 1512.18 kg/m³ en condición suelta y 1625.01 kg/m³ en estado compactado, módulo de fineza de 7.82 y con la granulometría mostrada en la siguiente figura:

68

Figura 2. Granulometría de agregado grueso



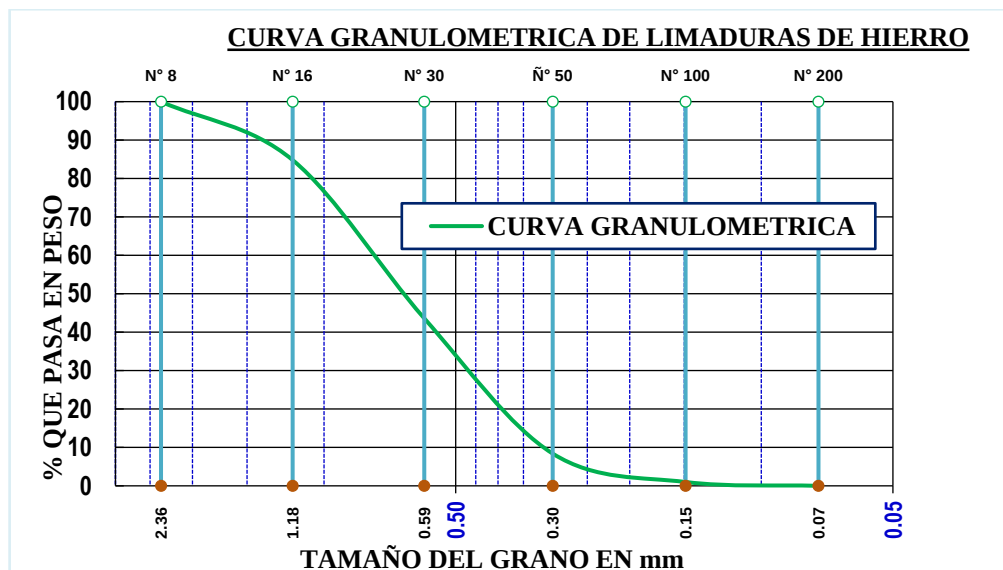
2.1.2.3. Limaduras de Hierro (L.H.)

Son pequeñas partículas de hierro o polvo metálico. Estas limaduras pueden resultar de procesos industriales, como el mecanizado de piezas de hierro, y se añaden al concreto con el propósito de potenciar algunas de sus propiedades, como su resistencia y durabilidad (Olawale et al., 2021).

Su composición varía según la aleación de hierro de la que provienen, y pueden contener pequeñas cantidades de carbono, silicio y otros elementos presentes en el acero (Smith & Hashemi, 2018).

40

Figura 3. Curva granulométrica limaduras de hierro



2.2. Metodología

2.2.1. Tipo de investigación

Corresponde a un estudio experimental, dado que se controlarán las variables independientes con el fin de analizar su impacto en variables dependientes, controlando otras posibles influencias (Hernández et al., 2014).

De enfoque cuantitativo porque se calcularon variables, tiene un diseño para probarlas, se hallaron en un contexto determinado, se analizan los datos y se extraen conclusiones (Hernández et al., 2014).

2.2.2. Población y Muestra

La población estará constituida por concreto elaborado con reemplazo del agregado fino por limaduras de hierro en distintas proporciones. Estas L.H. son procedente de tornos ubicados a los alrededores de la ciudad de Juliaca, y la unidad de análisis serán probetas cilíndricas de concreto para ensayos a compresión.

Población: En un estudio es el total de elementos, personas, objetos o datos que conforman el universo de estudio. Las poblaciones pueden ser determinadas o indeterminadas. Si la población es determinada y pequeña, es posible medir cada unidad para conocer exactamente sus características (parámetros). Sin embargo, si la población es indeterminada o grande, se extrae una muestra representativa, y a partir de las características de esta muestra (estadísticos), se hacen inferencias sobre la población en general (Gutiérrez & Salazar, 2008).

El concreto producido con L.H. en reemplazo de Agregado Fino, será la población determinada para el presente estudio.

Muestra: La investigación tiene un muestreo probabilístico aleatorio.

Para la obtención del número de muestras se hará uso de la desviación estándar obtenida de estudios previos relacionados con la adición de materiales reciclados en el concreto.

Se empleo la desviación estándar de la siguiente investigación “INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE VIDRIO MOLIDO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO, TRUJILLO 2019”:

Tabla 2. Desviación estándar de investigaciones previas.

Descripción	Media (Kg/cm ²)	Desv. Estándar (Kg/cm ²)
Prob. Patrón	238.9	7.44
30% Vidrio	232.99	9.3
40% Vidrio	239.02	13.16
50% Vidrio	228.5	74.44
60% Vidrio	249.24	116.68

A partir de la siguiente ecuación obtenemos el número de muestras “n”.

$$n = \frac{Z^2 * S^2}{E^2}$$

Se obtiene n=1.49 muestras, por lo tanto, se tomó una muestra de 3 probetas por grupo.

2.2.3. Diseño Experimental

Se ha hecho uso de la estadística inferencial, que permite realizar conclusiones y generalizaciones concernientes a una población tomando como base, datos obtenidos de una muestra (Rodríguez, 2007). Su papel principal es la interpretación de datos, realizar proyecciones y establecer comparaciones. Esta área de la estadística utiliza diversas técnicas para hallar estas inferencias, como estimación de promedios (incluyendo rangos de confianza), contraste de hipótesis y análisis de varianza.

A través del método ANOVA se comparó las medias de capacidad a la compresión, flexión y slump entre los cuatro grupos de ensayo (4, 8, 12 y 16% L.H.). Un resultado significativo en el ANOVA sugiere que al menos uno de los porcentajes de limaduras de hierro afecta de forma distinta en la capacidad resistente del concreto en comparación con al menos otro porcentaje. Además, se efectuó el test ANOVA de dos factores para analizar la interacción entre la proporción A-C y el porcentaje de limaduras de hierro en la capacidad a la compresión, capacidad a flexión y el slump del concreto. Finalmente, si la interacción entre proporción de mezcla y las limaduras de hierro resulta significativa (p

< 0.05) en el test ANOVA de dos factores, se da inicio a realizar una prueba de superficie de respuesta para identificar los factores individuales o interacciones que impactan significativamente en la capacidad a la compresión, flexión y slump del concreto.

Con los resultados provenientes de este análisis ANOVA se podrá contrastar la siguiente hipótesis nula o alterna:

H0= Las limaduras de hierro no tienen ningún efecto significativo sobre la capacidad a la compresión al reemplazarse por el A.F. en el concreto ($F_{calculada} < F_{tabla}$).

H1= Las limaduras de hierro tienen un efecto significativo sobre la capacidad a la compresión al reemplazarse por el A.F. en el concreto ($F_{calculada} > F_{tabla}$).

Tabla 3. Resumen de ensayos realizados al concreto.

Ensayo	Edad del concreto por días	Normativa	Relación A/C	% Limaduras De Hierro				
				0	4	8	12	16
				Número De Muestras				
Slump (Pulg)	0	NTP 339.035	0.4	3	3	3	3	3
			0.5	3	3	3	3	3
			0.6	3	3	3	3	3
Capacidad a Compresión (kg/cm²)	7	NTP 339.034	0.4	3	3	3	3	3
			0.5	3	3	3	3	3
			0.6	3	3	3	3	3
	14		0.4	3	3	3	3	3
			0.5	3	3	3	3	3
			0.6	3	3	3	3	3
	28		0.4	3	3	3	3	3
			0.5	3	3	3	3	3
			0.6	3	3	3	3	3
Resistencia a La flexión (kg/cm²)	28	NTP 339.079	0.4	2	2	2	2	2
			0.5	2	2	2	2	2
			0.6	2	2	2	2	2

2.2.4. Proceso de ejecución.

2.2.4.1. Ensayos realizados a los materiales

A los materiales usados en esta investigación se hicieron los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico (NTP 400.012:2001)
- Método para determinar el peso unitario del agregado (NTP 400.017:2011)
- Determinación del peso específico y la absorción de agregados (NTP 400.022:2013)
- Determinación del peso específico de Limaduras de hierro (NTP 400.022:2013)

2.2.4.2. Tratamiento de limaduras de Hierro

El uso de limaduras de hierro en concreto ha demostrado influir en sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Estudios indican que una adición del 4% incrementa la capacidad a compresión sin afectar la trabajabilidad, por otro lado, el 8% optimiza la absorción de agua y la durabilidad. Con el 12%, se observa una mejora en la resistencia mecánica, pero con una ligera reducción en la trabajabilidad. Finalmente, el 16% puede generar segregación y disminuir la cohesión de la mezcla, aunque puede ser útil en aplicaciones donde se requiera mayor densidad. La selección de estos porcentajes responde a la necesidad de evaluar la variación progresiva en las propiedades al incorporar limaduras de hierro en el concreto, identificando el punto óptimo donde se maximicen sus beneficios sin comprometer su desempeño mecánico.

Estas limaduras de hierro se obtuvieron de las principales empresas dedicadas industria de metalmecánica en la ciudad de Juliaca. Posteriormente se realizó el tamizado por la malla #10, teniéndose partículas menores a 2 mm, para la incorporación de estas a cambio del agregado fino en proporciones de 4%, 8%,12% y 16% en la mezcla del grupo de experimentación.

2.2.4.3. Diseño de mezcla de muestra

El diseño de mezcla se elaboró con el método propuesto por el ACI, es un método organizado para definir las proporciones correctas de los elementos que componen el concreto, con el fin de alcanzar la resistencia y durabilidad requeridas para un proyecto. Este proceso implica calcular la cantidad adecuada de cemento, agua, agregados y aditivos. Sigue pasos específicos del ACI, que incluyen estimar la resistencia necesaria, ajustar la proporción A-C y probar las mezclas para realizar ajustes según sea necesario (A.C.I., 2001). Con la variación de reemplazar en porcentaje de volumen del agregado fino por limaduras de hierro como indica en la tabla 4.

Tabla 4. Dosificación de mezcla por bolsa de cemento.

Descripción	Prop. A-C 0.4		Prop. A-C 0.5		Prop. A-C 0.6	
	Peso	Volumen	Peso	Volumen	Peso	Volumen
Cemento	42.50 kg	1.00 ft ³	42.5 kg	1 ft ³	42.50 kg	1.00 ft ³
Agregado Fino	40.37 kg	0.86 ft ³	59.08 kg	1.26 ft ³	78.20 kg	1.66 ft ³
Agregado Grueso	79.05 kg	1.85 ft ³	99.03 kg	2.31 ft ³	118.58 kg	2.77 ft ³
Agua (lt.)	16.71	16.71	20.74	20.74	24.77	24.77

2.2.4.4. Cuantificación de la capacidad a la compresión

El ensayo a compresión es una técnica utilizada para medir la capacidad a compresión del concreto, bajo la aplicación de carga axial hasta alcanzar el punto de ruptura. Este ensayo juega un rol principal en el proceso de validación de la capacidad de carga de los materiales de construcción y se realiza aplicando una carga gradual sobre una muestra hasta que esta se rompe, midiendo la resistencia máxima alcanzada (NTP 339.034, 2015).



Figura 4. Máquina de ensayo a compresión (NTP 339.034)

2.2.4.5. Cuantificación de la resistencia a la flexión

Implica la exposición una muestra de concreto, generalmente una viga o prisma, a una carga que actúa en su centro o en puntos específicos para inducir flexión. La capacidad a flexión se obtiene midiendo la carga máxima que puede soportar la muestra antes de que ocurra una falla, así como el comportamiento del concreto bajo la carga aplicada (NTP 339.079, 2019).



Figura 5. Prueba de resistencia a la flexión (NTP 339.079)

2.2.4.6. Cuantificación de la trabajabilidad

Este ensayo brinda una estimación de la trabajabilidad del concreto, es decir, qué tan fácil es de mezclar, manipular y colocar. El slump se mide observando la reducción en altura de un cono de concreto después de retirar el molde, reflejando la capacidad de la mezcla para fluir (NTP 339.035, 2009).



Figura 6. Prueba de Slump con el cono de Abrams (NTP 339.035)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para generar los resultados en esta investigación se tuvo 1 grupo de control y 4 grupos con tratamiento de limaduras de hierro (4,8,12 y 16%), para 3 proporciones de agua-cemento (0.4,0.5 y 0.6) los cuales a continuación se muestran los resultados obtenidos para la evaluación de la trabajabilidad, capacidad a la compresión y flexión del concreto.

3.1. Trabajabilidad de la Mezcla

Al realizar la prueba o ensayo de slump para los grupos de tratamiento (4,8,12 y16%) y control propuesto, se observan los datos registrados:

Tabla 5. Prueba de Slump.

Proporción A/C	%L.H.	Promedio (Pulg)	Desviación Estándar (Pulg)
0.60	0%	3.92	0.19
	4%	5.88	0.13
	8%	5.58	0.14
	12%	7.04	0.07
	16%	7.16	0.33
0.50	0%	3.71	0.19
	4%	3.88	0.13
	8%	3.00	0.13
	12%	2.67	0.14
	16%	2.10	0.28
0.40	0%	2.83	0.62
	4%	1.78	0.40
	8%	1.84	0.39
	12%	1.46	0.32
	16%	1.28	0.16

Se realizaron 3 pruebas por ensayo (%L.H.), obteniéndose los promedios mostrados en la tabla 5, esto para conocer el efecto causado por las L.H. en la trabajabilidad de la mezcla fresca de concreto. Visualizándose de manera explícita en la siguiente gráfica:

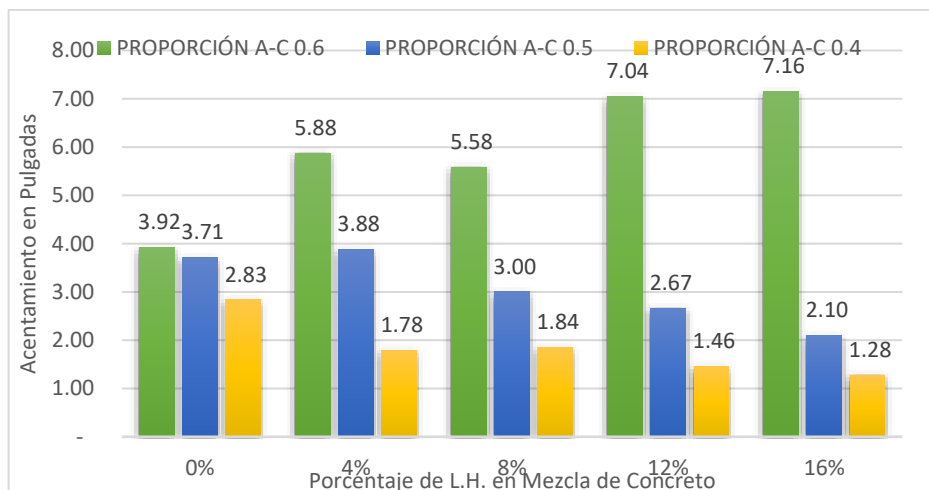


Figura 7. Asentamiento de Mezcla Fresca

En la Figura 7 se presenta un histograma que evidencia un incremento en la trabajabilidad del concreto al incorporar limaduras de hierro (L.H.) en una proporción agua/cemento de 0.6. Sin embargo, en las demás proporciones agua/cemento evaluadas, se observa una disminución del slump en función del incremento gradual de porcentaje de limaduras de hierro. Asimismo, se aprecia que en la proporción A-C de 0.6, el incremento en la cantidad de L.H. genera un aumento lineal en la trabajabilidad del concreto, mientras que en proporciones menores de agua/cemento, el efecto es inverso, es decir, la mezcla tiende a perder fluidez.

Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos por Zanabria & Salazar (2019) quienes evaluaron la fluidez del concreto líquido (grout) al reemplazar parcialmente la arena fina con limaduras de hierro en proporciones del 2 %, 5 % y 10 %. En su estudio, se registró un incremento en la fluidez en todos los tratamientos, destacando que la mezcla con un 10 % de limaduras alcanzó una fluidez del 136.22 %, en comparación con el concreto patrón, que presentó una fluidez del 112.84 %. Del mismo modo, Noori & Ibrahim (2018) sostienen que la trabajabilidad mejora progresivamente con la inclusión de L.H. en la mezcla.

En relación con la presente investigación, estos resultados permiten reafirmar que la incorporación de limaduras de hierro incrementa la fluidez del concreto, especialmente cuando se trabaja con relaciones agua/cemento altas (≥ 0.6). Esto sugiere una posible interacción entre la cantidad de limaduras de hierro y la proporción de agua/cemento en

la trabajabilidad del concreto. Para verificar esta interacción, se propone la aplicación de un modelo de superficie de respuesta, lo que permitirá cuantificar estadísticamente la significancia de estos factores y su impacto en las propiedades del concreto.

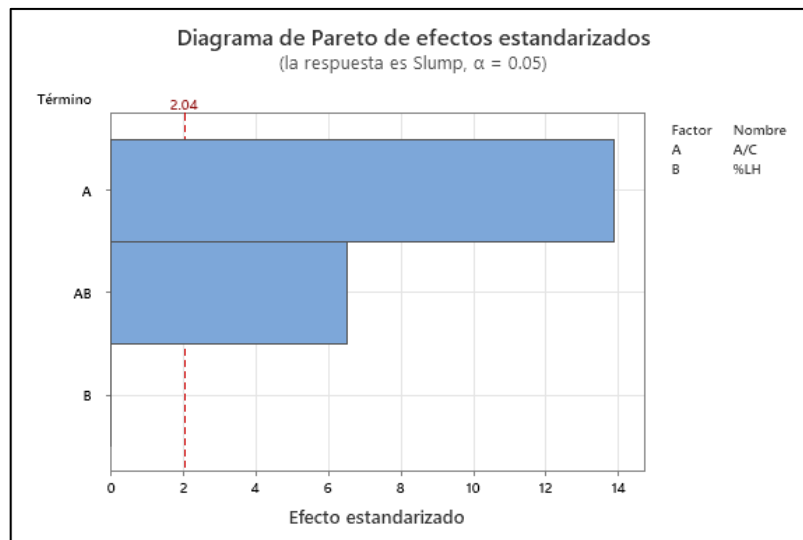


Figura 8. Diagrama de Pareto de Factores Intervinientes en el Slump

En la Figura 8, se observa que la interacción entre los factores proporción agua/cemento y limaduras de hierro (LH) tiene un efecto significativo sobre el slump del concreto, con un valor T calculado = 6.2, superior al valor crítico $T = 2.04$ (para $\alpha = 0.05$). Esto indica que la integración de limaduras de hierro influye en la trabajabilidad del concreto de manera variable, dependiendo de la proporción de mezcla utilizada.

Estudios previos han reportado diferentes hallazgos sobre este fenómeno. Chileno (2019) investigó la producción de concreto pesado mediante intercambio del A.F. por limaduras de hierro en proporciones del 20 %, 30 %, 40 %, 50 % y 60 %, empleando porcentajes A-C de 0.40, 0.50 y 0.60. Sus resultados indicaron un incremento del slump en todas las combinaciones evaluadas en comparación con el concreto patrón. Por otro lado, Chávez (2014) analizó concreto con la inclusión de 4 %, 6 % y 8 % de limaduras de hierro, concluyendo que la trabajabilidad no presentó variaciones significativas, manteniéndose dentro de un rango de slump de 3 a 4 pulgadas en todos los casos.

Los resultados en contraste con estos estudios, evidencian una discrepancia. Mientras Chileno (2019) reporta un efecto positivo del uso de L.H. en todas las proporciones de agua/cemento y Chávez (2014) no encuentra cambios significativos en la trabajabilidad, el presente estudio demuestra, a través del análisis estadístico de superficie de respuesta, que existe una interacción significativa entre la proporción agua/cemento y el porcentaje de limaduras de hierro, lo que confirma que su efecto sobre la trabajabilidad del concreto no es uniforme y depende de la combinación específica de estos factores.

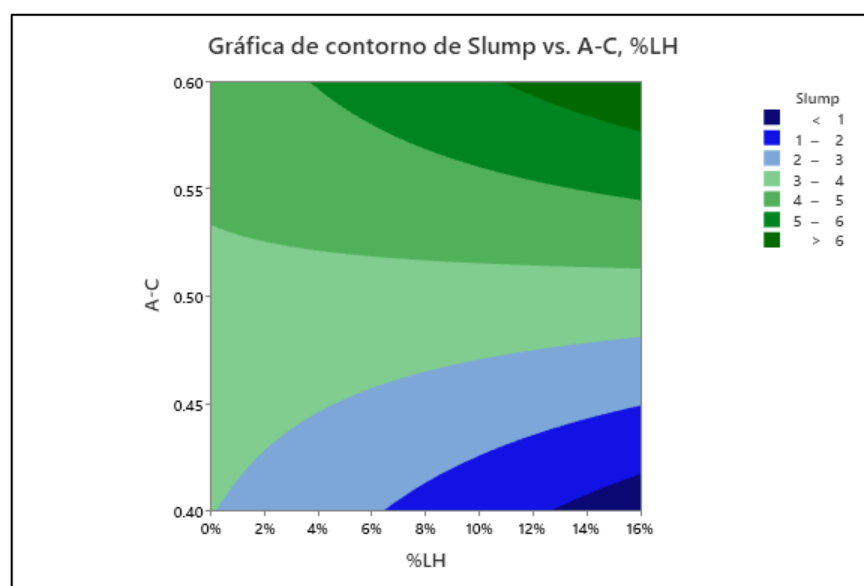


Figura 9. Superficie de Respuesta de Factores Intervinientes en el Slump.

En la figura 9 se puede apreciar la superficie de contorno de los factores intervinientes, la cual fue generada con la ecuación de modelo de regresión múltiple, la cual nos permite predecir los posibles valores adoptados por el slump, de acuerdo a los factores (Proporción agua/cemento y L.H.) con los cuales se esté trabajando la mezcla de concreto.

Los resultados favorables en la trabajabilidad del concreto que incluye limaduras de hierro se atribuyen a una característica específica de este material, que es su menor porosidad en comparación con los áridos comúnmente empleados en la elaboración de concreto. Esto significa que no absorbe agua cuando la relación agua-cemento es de 0.60. Sin embargo, al utilizar proporciones de agua-cemento más bajas (0.40 y 0.50), se observa

una reducción en la trabajabilidad. Esto se debe a que las limaduras de hierro tienen un tamaño de partícula inferior al de los áridos que reemplazan, lo que incrementa el área que necesita hidratación. Si no hay suficiente agua disponible para este proceso, se produce una disminución en la trabajabilidad del concreto. Este comportamiento ha sido respaldado por diversas investigaciones que examinan el desempeño físico y mecánico del hormigón con adiciones de limaduras de hierro.

A partir de los resultados de otros investigadores y los hallazgos de este estudio, podemos afirmar que las limaduras de hierro influyen en la trabajabilidad del concreto. Este efecto está determinado por dos factores clave: la proporción A-C y el porcentaje de limaduras de hierro (%L.H.), los cuales interactúan entre sí y afectan la trabajabilidad, como se ilustra en la figura 9. Además, la fluidez, que también está relacionada con la trabajabilidad, se ve beneficiada por el aumento del slump en una relación agua-cemento de 0.6, observándose mejoras en todos los tratamientos (4%, 8%, 12% y 16%). Sin embargo, algunos autores sostienen que la trabajabilidad puede aumentar incluso con relaciones agua-cemento inferiores a 0.60.

3.2. Capacidad a la compresión

El resumen de la resistencia a compresión obtenida de los ensayos realizados para las proporciones de agua/cemento (0.60, 0.50 y 0.40) y grupos de tratamiento (4,8,12 y 16%) están agrupados por edades de curado de 07, 14 y 28 días, se observa a continuación la tabla y gráfico:

Tabla 6. Resultados de Resistencia a la Compresión

Proporción A/C	%L.H.	Resistencia A Compresión Promedio (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	Edad de curado (Días)
0.60	0%	125.77	6.96	7.00
	4%	124.00	6.41	7.00
	8%	134.53	3.71	7.00
	12%	162.20	10.27	7.00
	16%	140.77	5.03	7.00
0.50	0%	177.07	8.87	7.00
	4%	168.70	5.80	7.00
	8%	179.00	10.53	7.00
	12%	236.60	11.95	7.00
	16%	196.37	7.11	7.00
0.40	0%	247.47	7.05	7.00
	4%	225.57	17.50	7.00
	8%	215.07	4.90	7.00
	12%	291.93	3.18	7.00
	16%	232.47	4.22	7.00
0.60	0%	141.70	4.97	14.00
	4%	136.03	4.69	14.00
	8%	152.40	5.06	14.00
	12%	185.03	4.63	14.00
	16%	163.07	7.71	14.00
0.50	0%	218.23	3.84	14.00
	4%	198.67	9.41	14.00
	8%	197.83	6.58	14.00
	12%	265.93	4.24	14.00
	16%	213.37	5.31	14.00
0.40	0%	284.27	1.96	14.00
	4%	273.57	6.50	14.00
	8%	248.17	6.16	14.00
	12%	316.10	13.60	14.00
	16%	260.73	6.94	14.00
0.60	0%	176.27	1.90	28.00
	4%	152.80	4.78	28.00
	8%	167.93	11.16	28.00
	12%	202.80	6.46	28.00
	16%	179.23	7.05	28.00
0.50	0%	258.30	1.95	28.00
	4%	220.73	2.37	28.00
	8%	221.77	17.18	28.00
	12%	304.63	15.87	28.00
	16%	249.93	6.79	28.00

Proporción A/C	%L.H.	Resistencia a Compresión Promedio (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	Edad De Curado (Días)
0.40	0%	307.63	4.38	28.00
	4%	297.43	14.61	28.00
	8%	281.53	6.23	28.00
	12%	359.87	7.19	28.00
	16%	291.60	5.89	28.00

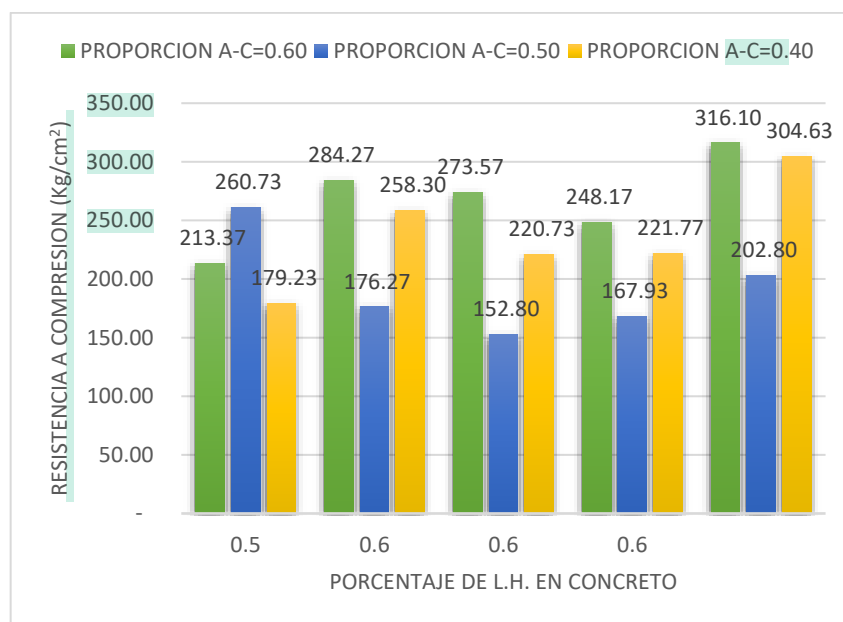


Figura 10. Capacidad a compresión con 28 días de curado.

En la Figura 10, se presenta la capacidad resistente a compresión alcanzada al término del periodo de curado de 28 días para todas las proporciones agua/cemento evaluadas (0.4, 0.5 y 0.6). Se observa que, en los tratamientos con 4 %, 8 % y 16 % de limaduras de hierro (LH), la resistencia disminuye en relación con el concreto de control (0 % LH). Sin embargo, en la mezcla con 12 % de LH, se tiene una mejora de la capacidad a la compresión en todas las proporciones de mezcla estudiadas.

Estos resultados contrastan con los reportados por Chileno (2019), quien investigó el reemplazo de arena por limaduras de hierro en proporciones del 20 %, 30 %, 40 %, 50 % y 60 %, utilizando tres relaciones agua/cemento. Sus hallazgos indicaron un incremento progresivo en la resistencia a la compresión a medida que aumentaba la cantidad de limaduras de hierro. De manera similar, Chávez (2014) analizó la resistencia a la

compresión de concretos con 4 %, 6 % y 8 % de LH, encontrando que la mezcla con 4 % LH presentó un incremento del 57 % en relación con el concreto convencional. No obstante, para porcentajes de 6 % y 8 % LH, la resistencia mostró una ligera reducción, aunque manteniéndose por encima del concreto sin aditivos.

En comparación con estos estudios previos, los resultados de la presente investigación muestran diferencias significativas. Para porcentajes de reemplazo superiores al 12 %, no se registran variaciones significativas en la resistencia, mientras que para valores inferiores al 8 %, se observa una reducción. Esto contradice lo reportado por Chávez (2014), quien indicó una mejora en la resistencia con 4 % LH, lo que sugiere que la interacción entre las limaduras de hierro, la proporción A-C y la compactación del material podría desempeñar un papel determinante en la evolución de la capacidad resistente del concreto.

3.2.1. Prueba Estadística de varianza (ANOVA)

Tabla 7. Prueba de ANOVA.

Proporción A/C	Ubicación de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F Calculada	Valor P	Valor crítico para F
0.60	Entre grupos	3,995.67	4.00	998.92	20.59	0.00008	3.48
	Dentro de los grupos	485.12	10.00	48.51			
	Total	4,480.79	14.00				
0.50	Entre grupos	14,104.78	4.00	3,526.20	29.27	0.00002	3.48
	Dentro de los grupos	1,204.77	10.00	120.48			
	Total	15,309.55	14.00				
0.40	Entre grupos	11,311.91	4.00	2,827.98	39.51	0.00000	3.48
	Dentro de los grupos	715.73	10.00	71.57			
	Total	12,027.64	14.00				

De acuerdo a la tabla 7 obtenida del análisis estadístico ANOVA realizado a las muestras con el curado de 28 días, se tienen tres grupos de proporción agua-cemento (0.6, 0.5 y 0.4) obteniéndose un F calculado de 20.59, 29.27 y 39.5 respectivamente con un valor $P < 0.00008$ para los tres grupos, estos valores son mayores al obtenido de la tabla

de valores de F crítico = 3.48 y menores al $P=0.05$, rechazándose la hipótesis nula de investigación.

Tabla 8. Prueba Tukey para la Proporción A/C de 0.60

F'c - Resistencia a la compresión					
LH (Limaduras de hierro)		N	Subconjunto para alfa = 0.05		
			1	2	3
HSD Tukey	4,00%	3	152.800		
	8,00%	3	167.933	167.933	
	0,00%	3		176.267	
	16,00%	3		179.233	
	12,00%	3			202.800
	Sig.		0.131	0.337	1.000

En la Tabla 8, se presentan los resultados de la prueba de Tukey, realizada para analizar la variación en las medias de varianza entre los grupos de tratamiento con limaduras de hierro (LH) al 0 %, 4 %, 8 %, 12 % y 16 %, utilizando una proporción agua/cemento de 0.6. Los resultados indican una variación significativa ($\alpha < 0.05$) en tres grupos según el porcentaje de limaduras de hierro. El primer grupo está compuesto por 4 % y 8 %, que mostraron las resistencias a la compresión bajas del estudio. El segundo grupo incluye 8 %, 0 % y 16 % de LH, cuyas medias de resistencia fueron similares a la del concreto de control. Finalmente, el tratamiento con 12 % de limaduras de hierro presentó una variación significativa en comparación con todos los demás tratamientos y con el concreto de control.

En relación con estos resultados, Zanabria & Salazar (2019) evaluaron las propiedades mecánicas del concreto grout con inclusión de limaduras de hierro, concluyendo que con una dosificación del 2 %, obteniendo una resistencia de 253.50 kg/cm², superior a la del mortero convencional. Sin embargo, los hallazgos de la presente investigación difieren de lo reportado por estos autores, ya que en este estudio se obtuvo una reducción en la resistencia a la compresión en los tratamientos con porcentajes menores al 12 % de LH. Esta diferencia podría deberse a que, al trabajar con concreto grout, el uso exclusivo de agregado fino genera una menor cantidad de vacíos en la matriz del material, lo que permitiría una mejor integración de las limaduras de hierro y un incremento en la resistencia.

Tabla 9. Prueba Tukey para la Proporción A/C de 0.50

F'c - Resistencia a compresión				
HSD Tukey				
LH	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
4,00%	3	220.733		
8,00%	3	221.767		
16,00%	3	249.933	249.933	
0,00%	3		258.300	
12,00%	3			304.633
Sig.		0.053	0.878	1.000

En la tabla 9 se muestra la prueba de Tukey, realizada para conocer la variación de las medias de varianza de los grupos de tratamiento de LH 0%,4%,8%, 12 % y 16% para la proporción agua-cemento de 0.5, de acuerdo a los resultados se tiene una variación significativa ($\alpha < 0.05$) en tres grupos de porcentajes de limaduras de hierro. El primer grupo está conformado por 4,8 y 16% que mostraron las resistencias a la compresión bajas del estudio, el siguiente está conformado por 0 y 16% LH que presentan una media similar a la del concreto de control, y finalmente se tiene al tratamiento de 12% que tiene comportamiento significativamente distinto en comparación con los demás tratamientos y concreto de control. Por su parte Vargas (2023) investigó la inclusión de limaduras de hierro en porcentajes de 2%, 4% y 6%, obteniendo un aumento progresivo en la capacidad a la compresión comparado al concreto patrón, y concluyó que la cantidad óptima de inclusión para alcanzar la máxima resistencia es de 8.75%.

Tabla 10. Prueba Tukey para la Proporción A/C de 0.40

F'c - Resistencia a compresión				
HSD Tukey				
LH	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
8,00%	3	281.533		
16,00%	3	291.600	291.600	
4,00%	3	297.433	297.433	
0,00%	3		307.633	
12,00%	3			359.867

En la tabla 10 contiene la prueba de Tukey realizada para conocer la variación de las medias de varianza de los grupos de tratamiento de LH 0%,4%,8%, 12 % y 16% para la proporción agua-cemento de 0.4, de acuerdo a los resultados se tiene una variación significativa ($\alpha < 0.05$) en tres grupos de porcentajes de limaduras de hierro. El primer grupo está conformado por 4,8 y 16% que mostraron la capacidad a compresión baja respecto al concreto de control, el siguiente está conformado 0,4 y 16% LH que presentan una media similar a la del concreto de control, y finalmente se tiene al tratamiento de 12% que tiene comportamiento significativamente distinto en comparación con los demás tratamientos y concreto de control. En referencia a los resultados obtenidos Yusuf (2019) investigó la adición de limaduras de hierro en pasta de cemento y mortero en porcentajes de 5%, 10% y 15%, encontrando que el máximo de resistencia a la compresión (61 MPa) se alcanzó con un 10% debido a los efectos de micro esfuerzos y la estabilidad microestructural. El tratamiento de 10% de Limaduras de hierro que presenta resultados positivos según el autor citado, es cercano al tratamiento de 12% de la presente investigación, que también presenta resultados positivos para todas las proporciones A-C.

Tabla 11. Prueba ANOVA de Interacción de 2 Factores (L.H.*A/C vs F'c)

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	140990,168 ^a	11	12817,288	143,440	,000
Intersección	2178133,222	1	2178133,222	24375,722	,000
DOSIFICACIÓN	112588,312	2	56294,156	629,994	,000
LH	25687,363	3	8562,454	95,823	,000
DOSIFICACIÓN * LH	2714,493	6	452,415	5,063	,002
Error	2144,560	24	89,357		
Total	2321267,950	36			
Total corregido	143134,728	35			

a. R al cuadrado = .985 (R al cuadrado ajustada = .978)

La Tabla 11, contiene la prueba ANOVA de dos factores, el cual evalúa la significancia de la variación en la interacción entre la proporción agua/cemento y el %LH en la resistencia a la compresión final del concreto tras 28 días de curado. Los resultados muestran un p-valor de 0.002, inferior al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, lo que indica la

existencia de una interacción significativa entre los factores %LH y la proporción agua/cemento.

Generalmente, un valor p menor que 0.05 ($p < 0.05$) sugiere que la diferencia entre grupos es estadísticamente representativa, lo que implica que es poco probable que haya ocurrido por casualidad. En contraste, un valor p mayor a 0.05 muestra que no hay evidencia necesaria para rechazar la hipótesis nula, lo que implica que el efecto evaluado podría no ser significativo (Montgomery, 2012)

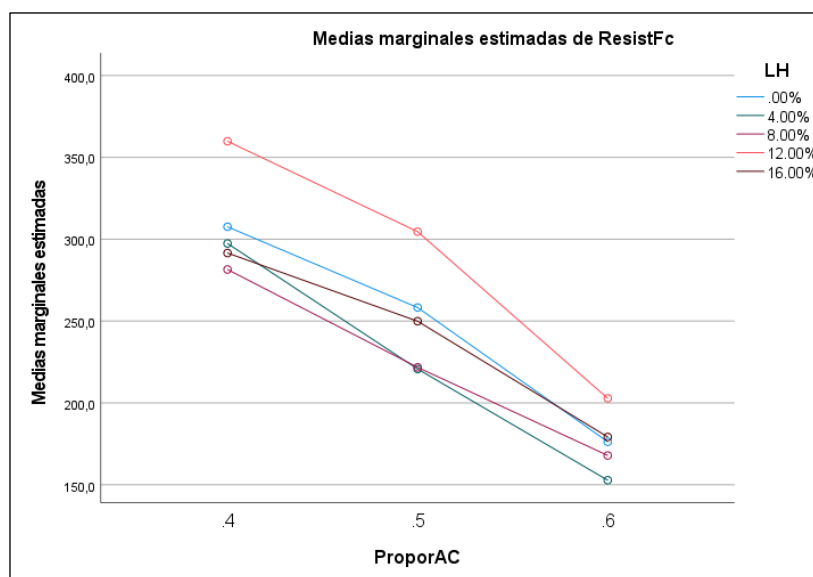


Figura 11. Interacción de tratamiento LH y Proporción A/C.

En la Figura 11, donde se observa la interacción entre los factores LH y proporción agua/cemento, identificada por la intersección en la gráfica de las medias marginales de los tratamientos con 4 % LH y 8 % LH. Sin embargo, dado que esta interacción no se manifiesta en las demás rectas correspondientes a los otros tratamientos, su efecto no se considera relevante en el análisis general.

Por otro lado, Mhawi & Dawood (2020) investigaron el uso de limaduras de hierro en tubos de acero rellenos de hormigón, reemplazando la arena en proporciones de 2.5 %, 5 % y 10 %, encontrando incrementos en la capacidad a la compresión del 11 %, 17 % y 25 %, respectivamente, en comparación con el concreto estándar. Conclusiones similares fueron reportadas por Noori & Ibrahim (2018), quienes determinaron que la resistencia a la tracción, compresión y flexión del concreto aumentaba hasta con un 12 % de residuos de hierro, alcanzando una mejora del 15 % respecto al concreto convencional. Asimismo,

Gonzales & Ly (2023) estudiaron la influencia de las L.H. y la escoria de acero en elementos de albañilería de concreto, encontrando que los muros fabricados con 10 % de limaduras satisfacen los parámetros establecidos en la Norma E060.

Comparando los resultados con estudios previos, se puede observar que el uso de limaduras de hierro en el hormigón presenta tanto potenciales beneficios como limitaciones. Algunas investigaciones han reportado incrementos significativos en la capacidad a la compresión al integrar limaduras en proporciones controladas. No obstante, estos resultados indican que las mezclas con 4 % y 8 % LH mostraron disminuciones en la capacidad a la compresión del 3.32 % y 8.48 %, respectivamente, en comparación con el concreto de control.

Los hallazgos de la presente investigación coinciden parcialmente con estos estudios, ya que se reafirma que el tratamiento con 12 % LH mostró incremento representativo en la capacidad a la compresión, superando al concreto de control en un 16.98 % cuando se utilizó una proporción A-C= 0.40. Esto sugiere que la dosificación adecuada de limaduras de hierro es un factor relevante para optimizar el rendimiento del concreto. Sin embargo, aunque las investigaciones citadas confirman la mejora en la resistencia al incluir limaduras de hierro en mezclas cementantes aplicadas a distintos elementos estructurales, no evalúan la interacción entre el %LH y la proporción agua/cemento. En este sentido, la presente investigación concluye que, a pesar del efecto de las limaduras de hierro en la resistencia, no se identifica una interacción significativa entre estos factores, según los resultados del ANOVA de dos factores.

3.3. Resistencia a la Flexión

Los resultados de los ensayos realizados para las proporciones de agua/cemento (0.60, 0.50 y 0.40) y grupos de tratamiento (4,8,12 y 16%) están contenidas en la tabla y gráfico siguientes:

Tabla 12. Resultados del ensayo a la flexión del concreto

Proporción A-C	%L.H.	Promedio F'r (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)
0.6	0%	26.46	1.8
	4%	19.69	1.02
	8%	23.41	0.99
	12%	30.66	3.67
	16%	23.41	0.99
0.5	0%	33.3	0.08
	4%	26.49	1.65
	8%	33.31	2.09
	12%	33.71	0.56
	16%	33.31	2.09
0.4	0%	30.58	0.84
	4%	28.66	1.61
	8%	33.64	2.22
	12%	33.94	2.76
	16%	33.64	2.22

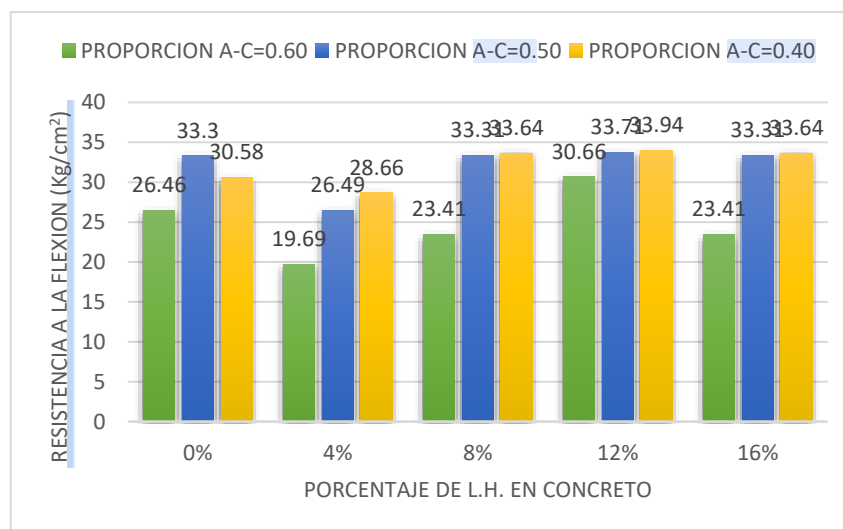


Figura 12. Capacidad a la flexión con 28 días de curado.

Los resultados obtenidos en la Figura 12 exponen que la capacidad a la flexión con 8%, 12% y 16% de limaduras de hierro (LH) se mantiene similar a la del concreto de control (0% L.H.), mientras que con 4% de L.H. se observa una reducción significativa, especialmente cuando la proporción de mezcla es de 0.6, donde la resistencia desciende hasta 19.69 kg/cm². Además, la mayor resistencia se alcanza con proporción de 0.4 y tratamiento de 12% L.H., lo que sugiere que un menor contenido de agua en la mezcla favorece la resistencia a la flexión.

Por otro lado, Mhawi & Dawood (2020) encontró que el uso de 2.5%, 5% y 10% de L.H. como reemplazo del A.F. incrementa la capacidad a la flexión en un 2%, 11% y 3%, respectivamente. Comparando estos valores con la presente investigación, se puede inferir que el efecto positivo de las limaduras de hierro en la capacidad a la flexión depende no solo del porcentaje de adición, sino también de la proporción utilizada, ya que, en la investigación actual, un 4% de L.H. mostró una reducción en la resistencia, mientras que en los estudios previos incluso valores menores reportaron mejoras.

Asimismo, Alserai et al. (2018) encontraron que el reemplazo del agregado fino por 0.5%, 0.75% y 1% de L.H. mejoró la capacidad a la flexión hasta en un 26% en relación con el concreto de control. Este incremento es mayor al registrado en la presente investigación, lo que sugiere que dosis bajas de L.H. pueden generar incrementos representativos en la resistencia a la flexión cuando se controlan otros factores como la granulometría del agregado y la compactación del concreto.

En general, los resultados de esta investigación coinciden en que la inclusión de limaduras de hierro puede mejorar la capacidad a la flexión, pero el efecto varía según la dosificación y la proporción agua/cemento utilizado. Mientras que otros autores reportan mejoras incluso con bajas adiciones de L.H., la presente investigación evidencia que el efecto beneficioso se mantiene estable hasta 12% L.H., sin una reducción marcada en 16%, salvo en el caso del tratamiento con 4% de L.H., donde se observa una disminución en todas las proporciones agua/cemento.

Tabla 13. Prueba ANOVA de la Capacidad a flexión del concreto

Proporción A/C	Ubicación de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F Calculada	Valor P	Valor crítico para F
0.6	Entre grupos	134.10	4	33.5261539	8.51044563	0.0187	5.1922
	Dentro de los grupos	19.69706131	5	3.93941226			
	Total	153.80	9				
0.5	Entre grupos	76.89	4	19.22	8.19753417	0.0202	5.1922
	Dentro de los grupos	11.72	5	2.34496219			
	Total	88.62	9				
0.4	Entre grupos	44.70	4	11.18	2.68738423	0.1537	5.1922
	Dentro de los grupos	20.79247479	5	4.15849496			
	Total	65.49	9				

La prueba (ANOVA) contenida en la Tabla 13, muestra que la resistencia a la flexión con limaduras de hierro (L.H.) tiene una variación representativa en función de la proporción utilizada. En este análisis, se plantea la hipótesis nula (H_0), que establece que no existe una diferencia significativa en la capacidad a la flexión entre los diferentes porcentajes de L.H. Por otro lado, la hipótesis alterna (H_A) postula que la variación en el contenido de L.H. sí tiene un efecto significativo en la resistencia a la flexión. Los resultados para $A/C = 0.6$ (Valor $P = 0.0187$) y $A/C = 0.5$ (Valor $P = 0.0202$), el valor P es menor que $\alpha = 0.05$, lo que permite rechazar la H_0 y concluir que el contenido de L.H. afecta significativamente la capacidad a la flexión en estas proporciones A-C. En la Figura 12, esto se refleja en una reducción notable de la resistencia con 4% de L.H., mientras que los valores con 8%, 12% y 16% L.H. se mantienen más cercanos al concreto de control. En contraste, para $A/C = 0.4$ (Valor $P = 0.1537$), el valor P es mayor a $\alpha = 0.05$, aceptándose la H_0 , lo que sugiere que las diferencias no son significativas en la resistencia a la flexión en función del contenido de L.H. Esto concuerda con la Figura 12, donde se establece la estabilidad en la capacidad a la flexión sin variaciones notables entre los diferentes porcentajes de L.H. Estos hallazgos resaltan que la combinación óptima de agua/cemento y contenido de L.H. es fundamental para maximizar la resistencia a la flexión, con una influencia más marcada en mezclas con mayor contenido de agua.

4. CONCLUSIONES

De los resultados, se determina que la integración de limaduras de hierro por agregado fino influye **significativamente en las propiedades del concreto**, particularmente **en la capacidad a la compresión** y la trabajabilidad, evidenciando incrementos de la resistencia con un 12% de limaduras de hierro (L.H.) para las proporciones agua-cemento estudiadas (0.40, 0.50 y 0.60). A pesar de las variaciones observadas, donde dosis de 4% y 8% de L.H. mostraron reducciones de hasta el 14.55% en comparación con el concreto de control, al integrarse un 12% de L.H. resultó en mejoras notables, alcanzando incrementos de hasta el 17.94%. En cuanto a la trabajabilidad, se destacó que el uso de limaduras de hierro mejora la fluidez del concreto, especialmente en la proporción agua-cemento de 0.60, aunque en las proporciones más bajas (0.40 y 0.50) se registraron reducciones en esta propiedad. El análisis ANOVA sugiere que no existen cambios significativos en la capacidad a la flexión entre el concreto control y el tratado con L.H. a una dosificación de 0.40; sin embargo, para las dosificaciones de 0.50 y 0.60 se observaron disminuciones considerables, alcanzando hasta un 25.61% con un tratamiento del 4% de L.H., mientras que el tratamiento con 12% de L.H. mostró un aumento del 15.84% en esta propiedad mecánica. En resumen, el tratamiento óptimo para la sustitución del agregado fino se establece en un 12%, que incrementa la resistencia del concreto en un 16.89%, mientras que otros tratamientos tienden a reducir dicha resistencia, subrayando así **la importancia de seleccionar adecuadamente la proporción de limaduras para optimizar las características del concreto**.

5. REFERENCIAS

- Alserai, S. J., Alsaraj, W. K., & Abass, Z. W. (2018). *Effect of Iron Filings on the Mechanical Properties of Different Types of Sustainable Concrete*. <https://doi.org/10.2174/187414950181201044>
- American Concrete Institute. (2001). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. American Concrete Institute.
- Banco Central de Reserva del Perú (BCRP). (2024). *El sector construcción aumentó 4.9% en octubre*. Banco Central de Reserva del Perú. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Transparencia/Notas-Informativas/2024/nota-informativa-2024-12-27.pdf>
- Chávez Ravines, J. E. (2014). Resistencia a la compresión de un concreto con adición de limaduras de hierro fundido. *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/515>
- Chileno Quispe, J. C. (2019). Uso de limaduras de fierro de estructuras metálicas para la elaboración de concreto pesado en la ciudad de Huancayo 2017. *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5941>
- Gonzales Tullume, L. E., & Ly Delgado, C. M. (2023). Influencia de la limadura de hierro y escoria de acero en las propiedades físicas y mecánicas de las unidades de albañilería de concreto. *Repositorio Institucional - USS*. <http://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/11859>
- Gunasekara, C., Seneviratne, C., Law, D., & Setunge, S. (2020). Feasibility of Developing Sustainable Concrete Using Environmentally Friendly Coarse Aggregate. *Applied Sciences*, 10, 5207. <https://doi.org/10.3390/app10155207>
- Gutiérrez, H., & Salazar, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos* (Segunda Edición, Vol. 1). McGRAW-HILL.
- Hernández, R., Baptista, P., & Fernández, C. (2014). *Metodología de la Investigación* (6a Edición, Vol. 1). McGRAW-HILL.

- INACAL. (2001). *Agregados. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global* (No. NTP 400.012:2001). Instituto Nacional de Calidad. <https://www.inacal.gob.pe>
- INACAL. (2009). *Hormigón (concreto). Método de ensayo para la medición de asentamiento del concreto de cemento portland* (No. NTP 339.035:2009). Instituto Nacional de Calidad. <https://www.inacal.gob.pe>
- INACAL. (2011). *Agregados. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad y los vacíos en los agregados* (No. NTP 400.017:2011). Instituto Nacional de Calidad. <https://www.inacal.gob.pe>
- INACAL. (2013). *Agregados. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino* (No. NTP 400.022:2013). Instituto Nacional de Calidad. <https://www.inacal.gob.pe>
- INACAL. (2015). *Concreto. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas* (No. NTP 339.034:2015). Instituto Nacional de Calidad. <https://www.inacal.gob.pe>
- INACAL. (2019). *Concreto. Método de ensayo para revenimiento* (No. NTP 339.079:2019). Instituto Nacional de Calidad. <https://www.inacal.gob.pe>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2003). *Design and Control of Concrete Mixtures* (No. CD100). Article CD100. <https://trid.trb.org/View/863024>
- Laurie García, C. M., & Rivero Orbe, J. A. (2021). Diseño de concreto simple $f'c=210$ kg/cm² adicionando limadura de hierro para mejorar su resistencia a la compresión, Tarapoto 2021. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/95184>
- Mhawi, A. L., & Dawood, A. O. (2020). Experimental investigation of some properties of square concrete-filled steel tubular columns containing iron filings as replacement of sand. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 888(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/888/1/012045>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
- Montgomery, D. C. (2012). *Diseño y Análisis de Experimentos* (2da. Ed.). Limusa.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson.
- Noori, K., & Ibrahim, H. (2018, enero 1). *Mechanical Properties of Concrete Using Iron Waste as a Partial Replacement of Sand*. <https://doi.org/10.23918/iec2018.16>

- Olawale, S., Kareem, M., Muritala, H., Adebajo, A., Alabi, O., Olawuyi, O., & Fadipe, O. (2021). Utilization of Iron Filings as Partial Replacements for Sand in Self-Compacting Concrete. *Tanzania Journal of Science*, 47, 906-916.
<https://doi.org/10.4314/tjs.v47i3.3>
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2018). *Foundations of Materials Science and Engineering* (6^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Vargas Minchán, E. N. (2023). *Análisis de la compresión del concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ con adición de 2%, 4% y 6% de limadura de hierro fundido, Cajamarca 2023*.
- Yusuf, M. (2019). Microstructure and strength of iron-filing Portland cement paste and mortar. *Инженерно-строительный журнал*, 90.
<https://doi.org/10.18720/MCE.90.3>
- Zanabria Quispe, J. G., & Salazar Hancoco, E. (2019). Determinación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto líquido fino “grout” adicionado con limaduras de acero 2%, 5% y 10% en comparación a un concreto líquido patrón convencional— Cusco 2018. *Universidad Andina del Cusco*.
<http://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/2727>