

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MEZCLAS DE MORTERO Y HORMIGÓN, INCORPORANDO AGREGADOS NATURALES E INDUSTRIALES PARA ESTRUCTURAS MARINAS

C. Quiroga Sánchez¹, C. Oyarzo Vera², M. Villagrán Valenzuela³

RESUMEN

El aumento de los desechos industriales y naturales en las empresas ha demandado de la creación de nuevos productos que permitan revalorizarlos, para de este modo disminuir los impactos ambientales. En este proyecto se exploró el uso de desechos naturales e industriales como agregado de morteros y hormigón. Para esto, se caracterizó de forma mecánica una serie de mezclas de morteros y hormigón, incorporando sustitutos naturales (concha de mitílido y paja de trigo) y residuos de la industria siderúrgica (Barro Conox) en diferentes proporciones. Se ensayaron probetas de mortero, al igual que cilindros de hormigón a compresión y flexotracción. Los resultados obtenidos demostraron la eficacia de la incorporación de los agregados residuales en las mezclas, pues se observó un aumento de hasta un 43% en las resistencias para algunas de las combinaciones, pero también disminución en las resistencias de hasta un 55% en otras dosificaciones.

Palabras claves: Mortero, hormigón, compresión, flexión, curado.

ABSTRACT

The growth of industrial and natural wastes in companies has demanded the creation of new products that allow them to be revalued, thus reducing environmental impacts. This project explored the use of natural and industrial wastes as aggregates for mortars and concrete. For this purpose, a series of mortar and concrete mixtures were mechanically characterized, incorporating natural substitutes (shell of mussel and wheat straw) and wastes from the steel industry (Conox mud) in different proportions. Mortar specimens were tested, as well as concrete cylinders in compression and flexotraction. The results obtained demonstrated the effectiveness of the incorporation of the residual aggregates in the mixes, since an increase of up to 43% in strength was observed for some of the combinations, but also a decrease in strength of up to 55% in other combinations.

Keywords: Mortar, concrete, compression, flexion, curing.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, cquirogas@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, covarzov@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mvillagran@ucsc.cl

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los desechos y residuos industriales por parte de las empresas es una realidad que preocupa tanto a las mismas empresas como a las comunidades que habitan en sus cercanías. Se sabe que Chile es un país cuya economía se basa en la explotación y exportación de materias primas, es por esto, que gran parte de lo que las industrias producen, también se ve reflejado en los residuos que generan. Por ejemplo, la Compañía Siderúrgica Huachipato (CSH) produce anualmente alrededor de 800.000 toneladas de acero, pero también genera aproximadamente 54.000 toneladas de residuos en ese mismo periodo, como por ejemplo el Barro Conox [1]. Por otro lado, en el rubro de la acuicultura, uno de los principales productos exportados es el mejillón o mitílido chileno, molusco con mayor cantidad de toneladas exportadas, con un aproximado a 67 mil toneladas anuales [2]. De forma similar, en la agricultura, el cultivo de trigo es el más importante, cubriendo una superficie de 380.000 ha sembradas, que también genera grandes problemas debido al manejo que se le da a la paja residual, la cual por lo general es quemada produciendo daños medioambientales debido al humo generado y aumentando el riesgo de incendios [3].

Ante esta problemática, y por medio de la eco-ingeniería se han buscado soluciones sustentables para disminuir la gran cantidad de desechos generados por estas compañías. Sabemos que Chile, país con un extenso borde costero con aproximadamente 3.000 km desde Iquique a Puerto Montt (18°S a 41°S), es un territorio que posee grandes infraestructuras marinas (rompeolas, diques, muelles, oleoductos, plataformas flotantes) [4]. Estas corresponden a 200 km de los 3.000 km de la costa lineal [5], que pese al gran rol que cumplen en favor de la ciudadanía y las localidades costeras, ha generado un enorme impacto ambiental en los ecosistemas marino-terrestres. Esta oportunidad se ha convertido en la opción más favorable para poder reutilizar y darles un uso a los residuos eliminados por las empresas, y de forma colateral, disminuir el impacto generado en el sector ingenieril, edificando estructuras que minimicen los efectos medioambientales negativos y que sean mecánicamente eficientes [6].

La materialidad con la que se construyen las infraestructuras marinas artificiales difiere de los sustratos de las infraestructuras naturales, tanto en su composición química (mineralogía, toxicidad) como en sus propiedades físicas (dureza, porosidad, color, textura) [7]. Existen estructuras artificiales fabricadas de mortero, el cual corresponde a una mezcla que está constituida por arena, cemento y agua [8], como también hay estructuras elaboradas de hormigón, que es una mezcla que se constituye de cemento, arena, agua y grava [9]. Estas mezclas proporcionan excelentes propiedades mecánicas y de resistencia en las estructuras, sin embargo, causan daño a los ecosistemas y la producción de sus materiales genera un gran impacto ambiental.

Investigaciones previas entregan información relevante con respecto a la utilización y revalorización de los residuos mencionados al comienzo. Respecto al Barro Conox, en Chile se está comenzando a investigar usos alternativos para este material [1], sin embargo, en base a resultados de ensayos mecánicos, han concluido que es viable la utilización de este material en elementos constructivos para adocretos y en albañilería [1]. Respecto a las conchas de mitílidos, existen investigaciones respecto a la utilización de concha utilizadas como agregado grueso en el hormigón [10]. Estos han demostrado que la sustitución de este residuo, en reemplazo porcentual en la arena, puede otorgar mejoras en la mezcla. En relación con las fibras de paja de trigo, autores internacionales han realizado investigaciones con respecto al uso y a la influencia de las fibras en las propiedades mecánicas y físicas de morteros de cemento [11], dando como resolución a sus investigaciones que este material orgánico aporta mejoras en la mezcla de mortero, siempre y cuando ésta presente un tratamiento previo a su aplicación.

Las aplicaciones que los autores mencionados anteriormente han realizado fueron para estructuras en ambientes secos y no sometidas a ambientes salinos ni de gran humedad. Además, el aglomerante de cemento utilizado es solo un cemento común. En esta investigación se plantea caracterizar las propiedades mecánicas de un conjunto de elementos tipo probeta y cilindro al sustituirle en diferentes proporciones los residuos industriales y naturales a la mezcla convencional del mortero y el hormigón. En la fabricación de los especímenes, se utilizó un cemento de alta resistencia (cemento portland) dado que las potenciales estructuras a elaborar se encuentran en un entorno marino. La investigación se encuentra sujeta a una serie de procedimientos para determinar la respuesta de cada mezcla elaborada, donde la premisa de esta es establecer un material que sea sustentable, y que mantenga o mejore las propiedades mecánicas de un mortero o un hormigón convencional.

METODOLOGÍA

2.1 Dosificación y materialidad

Con el fin de encontrar y determinar la dosificación de las mezclas más viables para la fabricación del hormigón, se realizó un primer set de ensayos de resistencia sobre muestras de mortero, para luego realizar los ensayos con las dosificaciones establecidas a muestras cilíndricas de hormigón.

Se propuso definir trece combinaciones diferentes en cuanto a materialidad y proporción de sustitución de residuos en la mezcla para la fabricación de los morteros (Matriz, M) (Tabla 1). Las matrices consideran como parámetros de interés el material utilizado como sustituto del aglomerante de cemento, el tipo y porcentajes de incorporación de agregados finos como sustituto de la arena (Barro Conox y concha de mitílido) y porcentaje de agregado adicional de fibra de paja de trigo. Las matrices M1 a M9 fueron comparadas con la matriz control que posee como aglomerante cemento portland de alta resistencia [9][12], agregado fino (arena fina, tamaño nominal inferior a 4mm) y agua en proporción del 50% en relación con el cemento.

Tabla 1. Factores de las matrices para la fabricación de los morteros

Matriz	Aglomerante sustituto al cemento	Porcentaje de sustitución	Agregado alternativo sustituto de la arena	Porcentaje de sustitución del agregado fino	Agregado Adicional
MControl	Ninguno	0	Ninguno	0	Ninguno
M1	Barro Conox	20	Ninguno	0	Ninguno
M2	Ninguno	0	Barro Conox	10	Ninguno
M3	Ninguno	0	Barro Conox	20	Ninguno
M4	Ninguno	0	Barro Conox	30	Ninguno
M5	Ninguno	0	Conchas	10	Ninguno
M6	Ninguno	0	Conchas	20	Ninguno
M7	Ninguno	0	Conchas	30	Ninguno
M8	Ninguno	0	Ninguno	0	Fibra (1%)
M9	Ninguno	0	Ninguno	0	Fibra (2%)
M10*	Ninguno	0	Barro Conox y Conchas	10 y 20	Ninguno
M11*	Ninguno	0	Barro Conox	10	Fibra 1%
M12*	Ninguno	0	Conchas	20	Fibras 1%

(*) Los porcentajes de agregado estuvieron sujetos a los resultados de los ensayos mecánicos de las matrices con el agregado individual. Fuente: Elaboración propia.

Los Barros Conox y las conchas de mitílidos fueron proporcionados por la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A y la empresa St. Andrews, respectivamente. Por una parte, previo a su uso, las conchas se sometieron a limpieza con agua para disminuir las sales, secadas a 60°C en un tiempo de 12 horas hasta obtener masa constante para eliminar el contenido de humedad y así triturarlas hasta obtener un tamaño nominal inferior a 4mm. De igual manera, el Barro Conox fue secado a la misma temperatura y tiempos que las conchas. Ver Figura 1 y Figura 2.



Figura 1: Barro Conox.
Fuente: Elaboración propia



Figura 2: Conchas de Mitílidos.
Fuente: Elaboración propia.

A su vez, la fibra de paja de trigo fue proporcionada por la empresa Huevos Agrochequen, la cual entregó el material en formato de fardo. Estas fueron trituradas y lavadas con la finalidad de mejorar la unión fibra-cemento y aumentar la tenacidad en el concreto. Las fibras de paja fueron pretratadas mediante un proceso físico de hornificación [13]. Este pretratamiento ha demostrado que rigidiza la estructura polimérica de las fibrocélulas, otorgando mayor estabilidad dimensional y mayor adherencia fibra-matriz. Asimismo, la fibra pretratada reduce la absorción de agua en la matriz de cemento [13]. Ver Figura 3.



Figura 3: Fibras de paja de trigo.
Fuente: Elaboración propia.

2.2 Descripción de especímenes

2.2.1 Probetas

Los materiales según la propuesta de combinaciones se incorporaron en una mezcladora siguiendo los estándares normativos para producir morteros [14]. La mezcla de mortero con las diferentes combinaciones, fueron depositadas en un set de moldes prismáticos de dimensiones 40 x 40 x 160 mm (ver Figura 4) durante 24 horas [8]. Así se obtuvieron las probetas que fueron sumergidas en agua saturada en cal a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por 28 días para realizar los ensayos de compresión y flexión según especificación de la norma. Se elaboraron 5 probetas de cada matriz y estas se destinaron para ensayos de flexión. Es importante destacar, que la dosificación para la elaboración de las probetas fue 1:3, en relación con la masa. Esto quiere decir, que se utilizó 1 kilo de cemento y 3 kilos de arena, en este caso, para fabricar 2 set de moldes como el de Figura 4 y Figura 5.

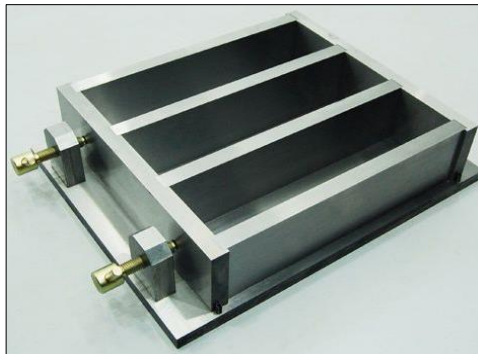


Figura 4: Molde Rilem para probetas de 4x4x16cm.



Figura 5: Especímenes fabricados en moldes Rilem.
Fuente: Elaboración propia.

En una segunda etapa, una vez obtenidas las mejores resistencias de las combinaciones de mortero propuestas de M1 a M9 y luego M10 a M12 (ver Tabla 1), se dispuso a realizar mezclas de hormigón. Las dosificaciones de las mezclas de hormigón se determinaron por recomendación del fabricante, el cual es Cementos BioBio. Estas dosificaciones fueron realizadas por volumen de los moldes, los cuales se encuentran detallados a continuación.

2.2.2 Cilindros

Los moldes cilíndricos de concreto cumplen con la normativa internacional con dimensiones de 150 mm de diámetro x 300 mm de altura [15] (ver Figura 6). La mezcla para los cilindros se elaboró en betonera (ver Figura 7) y según los tiempos y procedimientos por norma [9]. Se elaboraron 4 cilindros por cada matriz, los cuales se destinaron para ensayos de compresión. Los cilindros fueron desmoldados 24 horas después de su fabricación, luego, fueron sumergidos en agua por 28 días para ser curados (ver Figura 8).



Figura 6: Molde cilíndrico.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 7: Betonera 150L.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Descripción de métodos de ensayos

En esta investigación se realizaron los ensayos de compresión y flexión para morteros [8] y a compresión según normativa para cilindros de hormigón [16]. Es necesario la realización de estos ensayos, para poder conocer y caracterizar la resistencia mecánica del material propuesto, comparando la mezcla convencional con las diversas mezclas fabricadas. Ver Tabla 2.

Tabla 2: Ensayos realizados para obtención de la resistencia mecánica de las mezclas de mortero y hormigón

Ensayo	Propiedad	Normativa para morteros	Normativa para hormigones
Resistencia a la compresión	Resistencia mecánica	NCh158.Of67	ASTM C39
Resistencia a la Flexión	Resistencia mecánica	NCh158.Of67	ASTM C78

Previo a la realización de los ensayos mecánicos para los especímenes fabricados, fue necesario realizar un pretratamiento a algunos de ellos, en este caso los cilindros (ver figura 10), que debieron ser refrentados antes de ensayar, tal como lo indica la normativa [17]. El material para refrentado consistió en mezcla de yeso, cemento y agua con relación 1:1:1, aplicado en las secciones transversales de los cilindros, con el objetivo de obtener caras planas para una aplicación en compresión más uniforme.



Figura 10: Espécimen cilíndrico.
Fuente: Elaboración propia.

Todos los especímenes fueron ensayados posterior a los 28 días de curado. A continuación, se detallan los procedimientos para probetas, cilindros y vigas en sus respectivos ensayos.

2.3.1 Probetas

En primer lugar, los ensayos de probetas de 40x40x160 mm fueron realizados a flexión [8]. Se realizaron 5 ensayos de flexión por cada matriz (desde matriz MControl a M9) en el instrumento que se observa en Figura 11. La disposición de cada probeta fue tal como se observa en Figura 12. A fin de, realizar un análisis estadístico y característico para cada matriz, los datos de todos los especímenes fueron almacenados en una base de datos en Microsoft Excel.

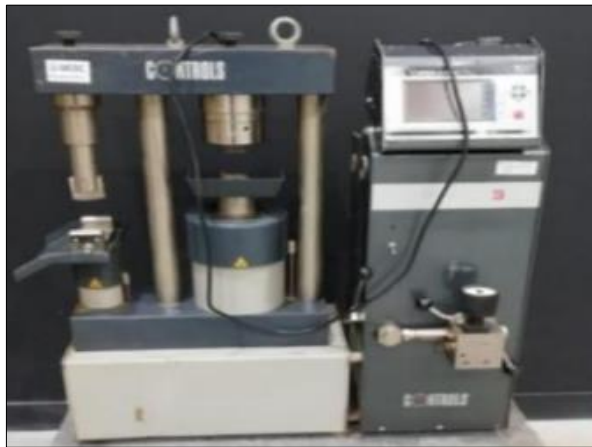


Figura 11: Prensa CONTROLS Model65-L11G2/C.
Fuente: Elaboración propia.

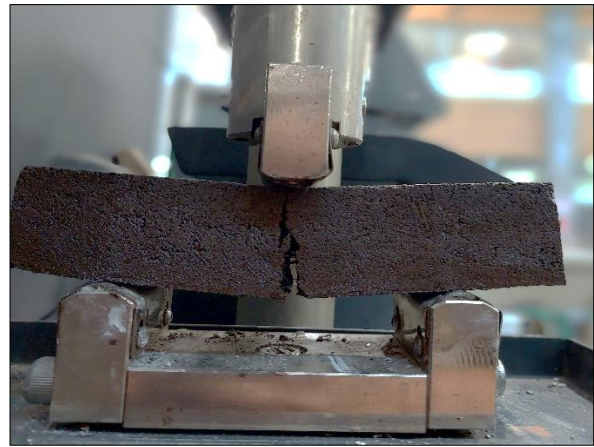


Figura 12: Espécimen en ensayo de flexión.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizados los 5 ensayos de flexión para cada una de las matrices, se procedió a medir las masas de los 10 trozos obtenidos de cada matriz (ver Figura 13), luego, fueron ensayados a compresión según normativa de ensayos a compresión para morteros [8] (ver Figura 14). Todos los ensayos mencionados anteriormente fueron realizados aplicando las mismas técnicas, posiciones y tiempos en cada una de las probetas, para obtener resultados consistentes en un ambiente de parámetros controlados.



Figura 13: Muestra de especímenes previo a ensayo a compresión. Fuente: Elaboración propia.



Figura 14: Espécimen ensayado a compresión. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2 Cilindros

Los cilindros previamente curados durante 28 días y refrentados, fueron ensayados con un equipamiento diferente al de las probetas de mortero (ver Figura 15). El instrumento aplicó cargas uniformes de compresión en los cilindros [16] (ver Figura 16). Para cada ensayo de compresión se debió limpiar la superficie de los platos, para no tener perturbaciones y esfuerzos incorrectos detectados por el instrumento. Cada ensayo se dio por finalizado cuando el cilindro se aplastó y se fracturó en todo su largo, tal como se muestra en Figura 17.



Figura 15: Instrumento Controls, Model Q0802/B. Fuente: Elaboración propia.



Figura 16: Espécimen previo al ensayo. Fuente: Elaboración propia.



Figura 17: Espécimen después del ensayo.
 Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

3.1 Resultado de probetas a ensayos de flexión y compresión

3.1.1 Matrices MControl a M9

A partir de los ensayos realizados, en Tabla 3 y Tabla 4, se detallan las resistencias de las probetas ensayadas, desde MControl a M9. Estos datos ingresados fueron en ton y en kg/cm^2 , sin embargo, los análisis se realizaron a partir de los datos en unidad de MPa, tanto para flexión, como compresión.

Tabla 3: Resistencia a la compresión de especímenes de mortero

Resistencia a compresión (MPa)										
MControl	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	
34,62	25,77	52,19	49,83	22,76	17,61	21,94	22,67	32,46	16,67	
29,32	26,00	49,74	42,46	46,43	21,78	22,67	21,65	19,05	16,10	
34,32	26,66	38,46	28,79	44,01	21,60	21,76	22,77	21,67	16,61	
37,91	28,40	53,07	45,76	22,71	23,83	23,48	21,16	20,31	14,41	
37,71	26,60	54,34	41,31	24,72	23,20	22,91	20,42	19,64	13,76	
100%	77%	143%	120%	92%	62%	65%	62%	66%	45%	Δ media $\left(\frac{M_{Control}}{M_n}\right)$

Tabla 4: Resistencia a la flexión de especímenes de mortero

Resistencia a flexión (MPa)										
MControl	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	
4,19	2,84	5,67	4,67	3,65	3,05	4,39	3,06	3,52	1,53	
4,16	3,63	2,41	5,84	3,45	3,96	3,98	2,49	5,45	1,31	
3,76	3,47	5,31	4,87	3,28	3,47	3,98	1,78	2,56	1,69	
3,90	1,99	6,52	5,55	3,364	2,97	3,45	1,43	2,43	1,66	
4,21	4,46	6,54	5,54	2,94	3,39	4,10	3,26	2,34	2,14	
100%	81%	131%	131%	82%	83%	98%	59%	81%	41%	Δ media $\left(\frac{M_{Control}}{M_n}\right)$

En Tabla 3, podemos observar que existen variaciones en las resistencias en comparación a MControl. Se puede observar que la matriz con mejores resistencias (M2) está por sobre un 43% que la matriz convencional. No así, M9, que es quien posee las peores resistencias, encontrándose un 55% por debajo de la resistencia de MControl.

En Tabla 4, podemos observar que existen variaciones en las resistencias en comparación a MControl. Se puede observar que la matriz o matrices con mejores resistencias (M2 y M3) están por sobre un 31% que la matriz convencional. Asimismo, la matriz con peores resultados es M9, encontrándose un 59% por debajo de la resistencia de MControl.

En Tabla 5, a modo resumen, se observa la variación de los datos tabulados en Tabla 3, así también, la resistencia media en compresión de las matrices. Se puede observar que la matriz M6 presenta datos más homogéneos que las demás, y se puede observar que la resistencia media más alta es la de matriz M2, siendo superior a MControl.

Tabla 5: Resistencia media y coeficiente de variación de matrices ensayadas a compresión

	Resistencia a compresión (MPa)									
	MControl	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Media	34,78	26,69	49,57	41,63	32,13	21,61	22,55	21,73	22,93	15,51
CV*	10%	4%	13%	19%	37%	11%	3%	5%	27%	9%

(*) C.V es el coeficiente de variaciones, si este es <30% los datos se consideran homogéneos, por otro lado, >30% los datos se consideran heterogéneos [18].

En Tabla 6, se observa la variación de los datos registrados en Tabla 4, así también la resistencia a flexión de las matrices. Se puede observar que la matriz M3 y M6 presenta datos más homogéneos que las demás, pero menos homogéneos a MControl. Pese a que M2 y M3 en flexión presentan una resistencia media similar, es más considerable M3 dado que la variación de sus datos es menor; presenta números más parecidos.

Tabla 6: Resistencia media y coeficiente de variación de matrices ensayadas a flexión

	Resistencia a flexión (MPa)									
	MControl	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
media	4,05	3,28	5,29	5,29	3,33	3,37	3,98	2,40	3,26	1,67
CV*	5%	28%	32%	9%	8%	12%	9%	33%	40%	18%

(*) C.V es el coeficiente de variaciones, si este es <30% los datos se consideran homogéneos, por otro lado, >30% los datos se consideran heterogéneos [18].

En la Figura 18 y Figura 19 se presentan los mismos resultados por medio de un gráfico boxplot, ofreciendo un análisis estadístico y comparativo, representando la distribución de las variables cuantitativas, en este caso, valores de resistencias máximas a compresión y a flexión para las probetas. Cabe destacar, que, a partir de estos datos, se obtuvieron las matrices M10, M11 y M12; escogiendo las 3 mezclas con mejores resultados.

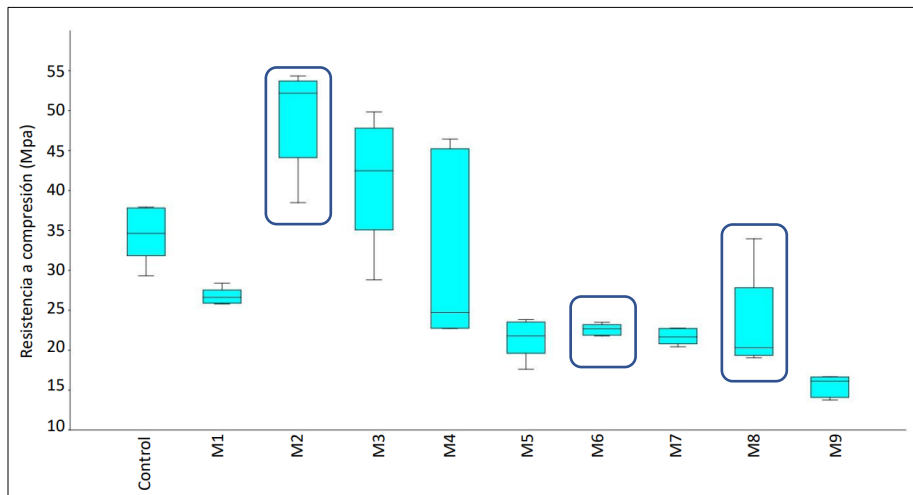


Figura 18: Gráfico boxplot con resultados de resistencia a la compresión para matriz MControl a M9.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en Figura 18, las matrices con mejores resultados por cada sustituto, tanto para Barro Conox, conchas y fibras, corresponden a las matrices M2, con 10% de sustitución de arena por Barro Conox; M6, con 20% de sustitución de arena por conchas; y M8, con 1% de agregado de paja de trigo a la mezcla convencional de mortero, para la compresión. Las probetas con mezcla de matriz M2 presenta resistencias más altas y homogéneas que M3, M4 y MControl. La matriz M6 presenta resistencias muy similares a M5 y M7, sin embargo, sus datos son más homogéneos que los demás, ahora bien, presenta resistencias más bajas a MControl. Por último, la matriz M8 presenta resistencias más altas que M9, a pesar de que, sus datos no se encuentran tan homogéneos y son menores a MControl.

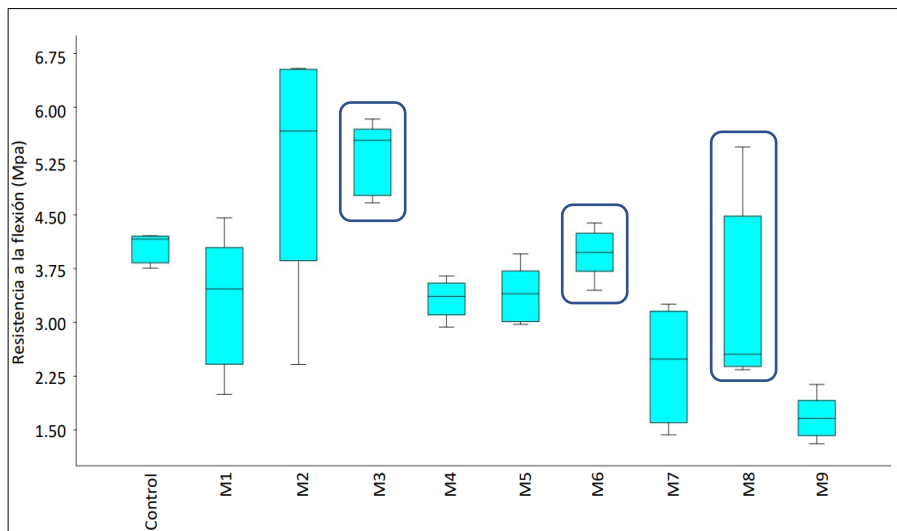


Figura 19: Gráfico boxplot con resultados de resistencia a la flexión para matriz MControl a M9.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en Figura 19, las matrices con mejores resultados por cada sustituto, tanto para Barro Conox, conchas y fibras, corresponden a las matrices M3, con 20% de sustitución de arena por Barro Conox; M6, con 20% de sustitución de arena por conchas; y M8, con 1% de agregado de paja de trigo a la mezcla convencional de mortero para la flexión. Las probetas con mezcla de matriz M3 si bien no tiene

resultados más altos a M2, en promedio presentan valores similares, con la diferencia que M3 posee resistencias más homogéneas en sus especímenes, sin embargo, M3 sí presenta mayores valores a M4 y a MControl. Por último, la matriz M8 presenta valores más elevados a MControl y a M9, por ende, es considerada esta dosificación también para la creación de cilindros y vigas.

3.1.2 Matrices M10 a M12

De los resultados obtenidos para matrices desde MControl a M9, se pudo identificar en Figura 18 y Figura 19 que las matrices con mejores resistencias fueron M2, M6 y M8, las cuales son reemplazo de arena por Barro Conox en un 10%, reemplazo de arena por conchas de mitílido en un 20% y agregado a la mezcla convencional de mortero un 1% en fibra de paja de trigo respectivamente, considerando netamente los resultados obtenidos para ensayos en compresión, dado que entregó resultados más elevados y en su aplicación, como las columnas, es más eficiente e importante. Ahora, la dosificación de las matrices M10 a M12 se pueden observar en la Tabla 7, además de los resultados de éstas, que se encuentran en Figura 20, Figura 21, Tabla 8 y Tabla 9, para compresión y para flexión, respectivamente.

Tabla 7: Matrices combinadas propuestas, basadas en matrices individuales con resistencias más altas

Matriz	Agregado 1 sustituto de la arena	Porcentaje de sustitución del agregado fino 1	Agregado 2 sustituto de la arena	Porcentaje de sustitución del agregado fino 2	Agregado Adicional
M10	Barro Conox	10	Conchas	20	Ninguno
M11	Barro Conox	10	Ninguno	0	Fibra 1%
M12	Conchas	20	Ninguno	0	Fibra 1%

Como resultado de los ensayos hasta M9, se propone realizar matrices con mezclas combinadas, tales como, M10, con 10% de Barro Conox y 20% de conchas en reemplazo de arena; M11, con 10% de reemplazo de arena por Barro Conox y 1% de agregado adicional de paja de trigo; y M12, con 20% de reemplazo de arena por conchas y 1% de agregado adicional de paja de trigo. La matriz con mejor resistencia a la compresión y flexión es incorporada dentro de las propuestas para la fabricación de especímenes de hormigón.

Tabla 8: Resistencia a la compresión de especímenes de mortero

Resistencia a compresión (MPa)		
M10	M11	M12
24,6	16,3	15,9
28,7	21,4	16,8
27,1	27,6	13,6
20,2	25,7	15,1

Tabla 9: Resistencia a la flexión de especímenes de mortero

Resistencia a flexión (MPa)		
M10	M11	M12
3,1	3,9	1,7
1,1	3	1,5
3,4	2,9	2,1
2,9	2,8	2,2

Se puede observar que en Tabla 8, los valores más altos se registran para matriz M10 en compresión, no así en flexión, siendo los valores más elevados para la matriz M11 (ver Tabla 9). Esto se puede comprobar,

observando la gráfica de Figura 20 y Figura 21, donde M10 en compresión y M11 en flexión, son los que presentan medias más elevadas.

Solo se considerarán los resultados de compresión a la hora de determinar matrices para especímenes de hormigón, dado que los resultados en flexión son mucho menores a los obtenidos en compresión.

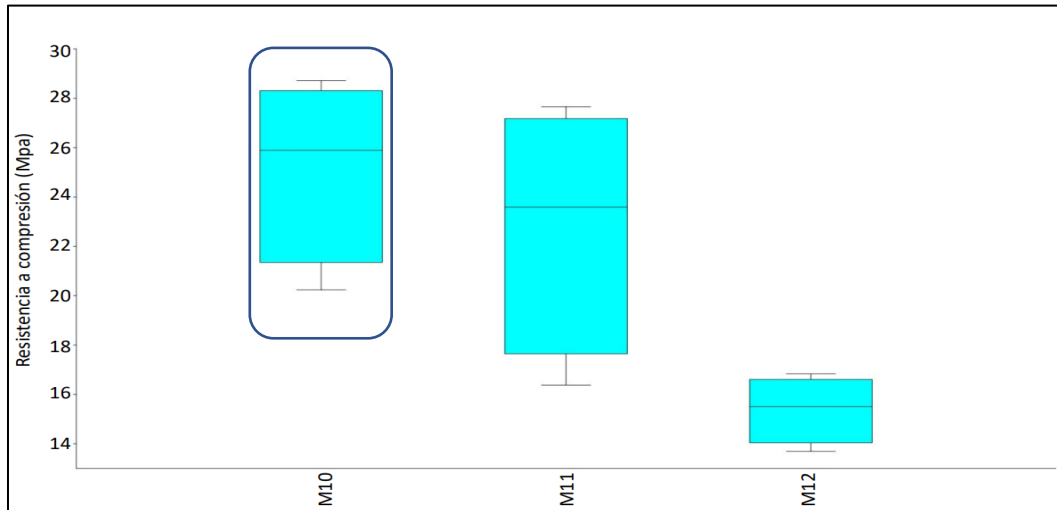


Figura 20: Gráfico boxplot con resultados de resistencia a la compresión para matriz M10 a M12.
 Fuente: Elaboración propia.

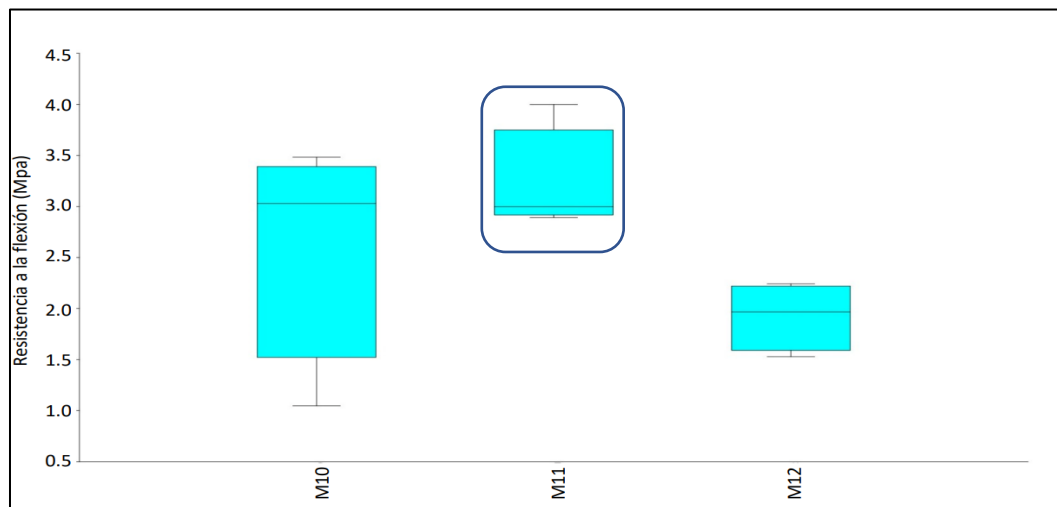


Figura 21: Gráfico boxplot con resultados de resistencia a la flexión para matriz M10 a M12.
 Fuente: Elaboración propia.

3.2 Resultado de cilindros de hormigón a ensayos de compresión

En Tabla 10, se observan los valores de las resistencias a compresión de los especímenes cilíndricos ensayados. Las resistencias en compresión más altas se encuentran en cilindros con sustitución de arena por Barro Conox en un 10%, dando en promedio 35.3 MPa, con un 7% de coeficiente de variación, verificando que los datos son homogéneos y el promedio es representativo para los datos de esa matriz.

Se deja en evidencia que, pese a todas las combinaciones propuestas, quien predomina en todo tiempo, es el reemplazo del Barro Conox.

Tabla 10: Resistencias a compresión de especímenes cilíndricos

Matriz de mortero	Matriz para concreto ídem.	MPa	Media	C.V*
Control	Control	22,7	20,6	10%
	Control	18,6		
	Control	20,5		
M2	Barros Conox 10%	36,1	35,3	7%
	Barros Conox 10%	37,3		
	Barros Conox 10%	32,4		
M6	Conchas 20%	23,2	24,1	20%
	Conchas 20%	29,4		
	Conchas 20%	19,8		
M8	Fibra 1%	23,2	23,3	14%
	Fibra 1%	20		
	Fibra 1%	26,6		
M10	BC 10% + C20%	26,2	24,3	19%
	BC 10% + C20%	17,4		
	BC 10% + C20%	25,6		
	BC 10% + C20%	28		

(*) C.V es el coeficiente de variaciones, si este es <30% los datos se consideran homogéneos, por otro lado, >30% los datos se consideran heterogéneos [18].

En Tabla 10, si bien la matriz que predomina es M2, mayor a todas las matrices con las que se le compara, es importante resaltar que todas las matrices presentan resultados con resistencias mayores a la mezcla convencional, lo que no invalida su uso para ninguna dosificación caracterizada, sin embargo, es importante señalar en que tipo de estructura se verá aplicada.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el caso del mortero, al comparar los resultados de la matriz MControl con los resultados de las otras matrices, esto quiere decir, de M1 a M9, se pueden observar valores muy similares y no existen datos atípicos dentro de los resultados, sin embargo, se puede observar que la matriz M2 presenta las resistencias más altas, aún por sobre MControl. Es importante mencionar que la dosificación de M2 corresponde a un reemplazo de arena por Barro Conox en un 10%.

4.1 Arena

Se puede observar en Figura 18 que realizar variaciones en la cantidad de la arena, genera variaciones en las resistencias. Esto se debe a que, en proporciones correctas, la arena mejora la homogeneidad de la mezcla, evitando fisuras, proporcionando mayor resistencia final a la mezcla y favoreciendo el volumen de esta. Por lo que, sustituir un 10% la masa de la arena por otro material es suficiente para no disminuir, sino más bien, aumentar la resistencia de la mezcla (dependiendo del material de reemplazo).

4.2 Barro Conox

Se puede observar en Figura 18 que sustituir en grandes proporciones el Barro Conox en la mezcla, este perjudicaba en su resistencia, sin embargo, se observa que sustituirlo en un 10% a la masa de la arena, este material sustituto ayuda a aumentar la resistencia, en comparación a MControl y las demás. El Barro Conox podría actuar como un material puzolánico en la mezcla, por poseer componentes químicos similares al material puzolánico que se incorpora al cemento portland en algunos casos, como lo es el óxido de Silicio (SiO₂), Oxido de Aluminio (Al₂O₂) y Fierro (Fe) [1]. Ver Figura 22.



Figura 22: Sección transversal de espécimen de Barro Conox.
Fuente: Elaboración propia.

4.3 Conchas de mitílidos

La sustitución de arena por conchas de mitílidos no fue muy significativa en ningún caso de los ensayos a compresión (ver Figura 18), el cual presentó resultados por debajo a MControl. En estricto rigor, la resistencia a la compresión disminuye a medida que aumenta (hasta cierto punto) el porcentaje de áridos de concha de mitílidos. Ver Figura 18.

Existen 3 principales razones que son compartidas con otros autores [10].

- La arena de concha de mitílido presenta una elevada absorción de agua, la cual podría haber debilitado la adherencia de la pasta de cemento con las partículas de árido.
- La forma plana de la concha de mitílido actúa como una barrera para el agua de exudación del mortero, lo que aumenta la relación agua-cemento. Esto, podría empeorar la adherencia de la pasta de cemento con las partículas de árido, disminuyendo la resistencia de la mezcla. Ver Figura 23.
- La presencia de polímeros y sustancias orgánicas, conduciendo a la disminución en la adherencia pasta-árido y a un aumento en la porosidad del espécimen, afectando sin duda a la resistencia del hormigón [19].

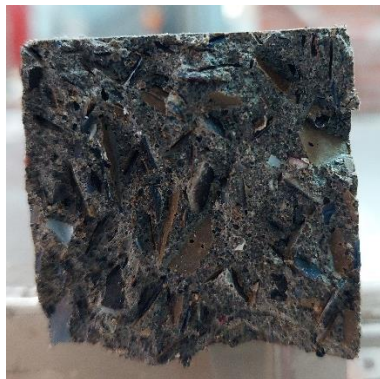


Figura 23: Sección transversal de espécimen de conchas de mitílido.
Fuente: Elaboración propia.

4.4 Fibras de paja de trigo

La presencia de fibras de paja reduce las propiedades mecánicas del mortero para un 1% de adición a la mezcla convencional en comparación a la misma (ver Figura 18). La reducción de la resistencia fue mayor para morteros con 2% de adición a sus mezclas, todo esto en compresión. La tendencia fue muy similar para resistencias a flexión (ver Figura 19). Esto, de acuerdo con el aumento de porosidad en su mezcla, este comportamiento es compartido con otros autores, en donde la adición de fibras aumenta el aire atrapado dentro de la matriz de cemento, reduciendo su compacidad, lo que proporciona una menor resistencia a compresión y flexión [11] [20]. Además, es importante considerar que la disminución de las propiedades mecánicas se pudo ver influenciada por la orientación de las fibras de paja durante la preparación de los especímenes, conduciendo a una distribución no homogénea dentro de la mezcla. Ver Figura 24 y Figura 25.

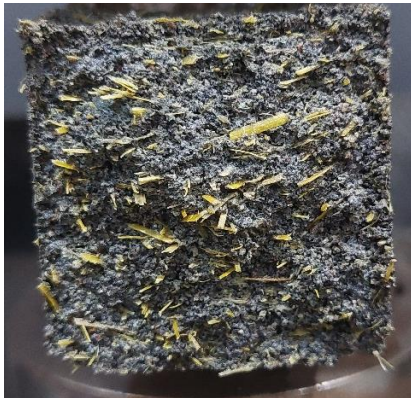


Figura 24: espécimen 1 con fibra de paja.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 25: Espécimen 2 con fibra de paja.
Fuente: Elaboración propia.

4.5 Ensayo de compresión en hormigón

Los ensayos realizados para matrices de mezclas combinadas fueron necesarios para conocer el comportamiento de los mismos materiales, pero con la incorporación de árido grueso, si bien, las mezclas cumplieron con todas las combinaciones posibles, y entregaron buenos resultados (ver Tabla 10), la matriz que continuó predominando fue M2, dando a entender y demostrando que el Barro Conox tiene un comportamiento eficiente tanto para morteros, como para hormigones.

CONCLUSIÓN

Es posible dar respuesta a todos los objetivos, tanto el general como los específicos.

Por una parte, considerando los análisis de resultados, se concluye que el reemplazo entre un 10% y 20% de arena, hace posible la incorporación de un residuo industrial como sustituto, como lo es el Barro Conox, para fabricación de morteros, haciendo factible y contribuyendo positivamente a las propiedades mecánicas del material.

Los especímenes con reemplazo de arena entre un 10% y 20% por Barro Conox en su dosificación, indican un comportamiento mecánico por encima de las otras mezclas incluyendo la mezcla convencional, alcanzando hasta un 42% más de resistencia que esta última (ver Tabla 5). Además, la reducción en uso de arena y revalorización de este residuo industrial es una alternativa responsable, sustentable y viable para el medio ambiente en el mundo de la construcción.



Por otra parte, la caracterización mecánica para el hormigón tiene una predominancia de la matriz M2, con un 10% de sustitución de arena por Barro Conox, sin embargo, todas las matrices que se utilizaron para caracterizar el hormigón, ya sea, M2, M6, M8 y M10, presentaron resultados con resistencias mas altas a la matriz MControl, por lo tanto, no existe una única opción ni se invalida el uso de las otras combinaciones para una futura aplicación.

Finalmente, la oportunidad de revalorizar los derechos industriales es una opción viable a la hora de fabricar morteros y hormigones, dado que, favorece a la industria reduciendo los efectos adversos causados por sus desechos y contaminación; favorece a la ingeniería y el ecosistema, construyendo y fabricando estructuras que, si son sostenibles y eficientes, capaces de resistir grandes esfuerzos, tal como se dio a conocer en el desarrollo de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible de realizar sin la ayuda y entrega de cada una de las personas que citaré a continuación.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, pues me ha acompañado y fortalecido durante todo este proceso académico y sin su compañía no habría podido alcanzar este paso en mi vida.

Agradezco a mis padres Ismael y Sara por todo el apoyo, confianza y entrega que han brindado a lo largo de mi vida y sobre todo en este periodo de crecimiento profesional, a mis hermanos Consuelo y Maximiliano que me han apoyado siempre y me han dado su amor y alegría que muchas veces hizo falta. A mi pareja Patricia, por su apoyo incondicional, paciencia, sabiduría y amor, por creer siempre en mí y darme aliento cuando he flaqueado. A mi tía, Paola, quien ha sido una segunda madre para mí, me ha apoyado y ha creído en mi desde el día uno.

Como no agradecer a mis abuelos y mis tíos quienes siempre se han sentido orgullosos de mí por mi esfuerzo y perseverancia, y agradecerles por enseñarme a ser humilde y un hombre de bien. Agradecer a mi pastor, quien ha sido un guía espiritual y me ha enseñado la disciplina necesaria para llegar a los lugares donde me encuentro y donde me encontraré.

En todo este periodo académico he conocido a grandes personas, con los cuales he formado lazos de amistad que sé no se perderán con los años. Agradecer a mis mejores amigos, quienes han confiado en mí y me han brindado momentos de reflexión y momentos gratos que me hacen entender que la vida no es solo trabajo.

También, quiero agradecer a mis profesores. En primer lugar, quiero agradecer al Doctor Claudio Oyarzo, por recibirme dentro de sus tesis y por facilitar siempre las gestiones para el avance de mi habilitación profesional. En segundo lugar, quiero agradecer al profesor, quien fue jefe de carrera, don Claudio Correa, por sus consejos sabios para poder abordar este camino universitario y por hacerme tomar buenas decisiones. En tercer lugar, quiero agradecer a Nashira Figueroa, por confiar en mí y por darme la oportunidad de desenvolverme en la materia, para contribuir en su tesis de doctorado, la cual mi tesis es parte de ella.

REFERENCIAS

1. Diaz, A., Oyarzo, C., Villagrán, M. (2022). “Caracterización mecánica de ladrillos fabricados con residuos industriales siderúrgicos”. Tesis para habilitación profesional. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
2. FAO (2005 -2019). “Visión general del sector acuícola nacional.” Retrieved noviembre, 2019.
3. ODEPA (2023). Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>.
4. Firth, L. B., Knights, A. M., Bridger, D., Evans, A., Mieskowska, N., Moore, P. J., ... & Hawkins, S. J. (2016). Ocean sprawl: challenges and opportunities for biodiversity management in a changing world.
5. Aguilera, M. A. (2018). Artificial defenses in coastal marine ecosystems in Chile: Opportunities for spatial planning to mitigate habitat loss and alteration of the marine community structure. *Ecological Engineering*, 120, 601-610.
6. Aguilera, M. A., Aburto, J. A., Bravo, L., Broitman, B. R., García, R. A., Gaymer, C. F., ... & Thiel, M. (2019). Chile: environmental status and future perspectives. In *World seas: An environmental evaluation* (pp. 673-702). Academic Press.
7. Loke, L. H., & Todd, P. A. (2016). Structural complexity and component type increase intertidal biodiversity independently of area. *Ecology*, 97(2), 383-393.
8. NCh 158.Of67. “Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento.” Norma Chilena Oficial. PA. 1967.
9. NCh 170:2016. “Hormigón- Requisitos generales.”
10. Falade, F. An Investigation of periwinkle shell as coarse aggregate for concrete. Great Britain: Elsevier Science, Building and Environment, 1995. págs. 573-577.
11. Soukaina Ajouguim, Maria Stefanidou, Karima Abdelouahdi, Mohamed Waqif & Latifa Saâdi (2022) Influence of treated bio-fibers on the mechanical and physical properties of cement mortars, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26:8, 3120-3135.
12. NCh 148. Of68. “Cemento- Terminología, clasificación y especificaciones generales”.
13. Claramunt, J., Ardanuy, M., García-Hortal, J. A., & Tolêdo Filho, R. D. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 586-595.
14. NCh2260.Of96. “Morteros- Preparación de mezclas de prueba y mezclas comparativas en el laboratorio”.



15. ASTM C192/C192M-02: “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”.
16. ASTM C39: ES- “Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto”.
17. NCh1172.Of78. “Hormigón – Refrentado de probetas”.
18. González, E. R. (1968). Estadística general (No. 16). Universidad Central de Venezuela.
19. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. D.H. Nguyen, Mohamed Boutouil, Nassim sebaibi, Lydia Leleyter, Fabienne Baraud. 49, Epron, France: Elsevier, 2013, Construction and Building Materials, págs. 151-160.
20. Boumhaout, M., Boukhattem, L., Hamdi, H., Benhamou, B., & Ait Nouh, F. (2017). Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. Construction and Building Materials, 135, 241–250.