

Caracterización mecánica de ladrillos y prismas de albañilería utilizando el método de velocidad de pulso ultrasónico

S. Matus Arévalo¹, C. Oyarzo Vera², E. Nuñez Castellanos³

Resumen

El objetivo de la presente investigación es lograr la caracterización mecánica de ladrillos y prismas de albañilería, utilizando el método de velocidad de pulso ultrasónico con el fin de ampliar el rango de conocimiento acerca de este tipo de ensayos en materiales y estructuras heterogéneas. Para esto se fabricaron especímenes de mortero, ladrillo y prismas de albañilería, sobre los cuales se realizaron distintas mediciones aplicando el método UPV. Posteriormente, los especímenes fueron sometidos a ensayos de compresión estandarizados para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales. Así, analizando la información proveniente de estos ensayos, se logró generar modelos para la predicción de las propiedades mecánicas en mortero, ladrillos y prismas de albañilería mediante el método de velocidad de pulso ultrasónico.

Palabras Claves: NDT, UPV, albañilería, ladrillo, mortero, caracterización mecánica.

Abstract

The objective of this research is to achieve the mechanical characterization of bricks and masonry prisms, using the ultrasonic pulse velocity method in order to expand the range of knowledge about this type of tests in heterogeneous materials and structures. For this purpose, mortar, brick and masonry prisms specimens were manufactured, on which different measurements were performed applying the UPV method. Subsequently, the specimens were subjected to standardized compression tests to determine the mechanical properties of the materials. Thus, by analyzing the information from these tests, it was possible to generate models for the prediction of the mechanical properties of mortar, bricks and masonry prisms by means of the ultrasonic pulse velocity method.

Keywords: NDT, UPV, masonry, brick, mortar, mechanical characterization.

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

² Profesor Guía, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, CHILE.
coyartzov@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, CHILE.
enunez@ucsc.cl

1. Introducción

La albañilería es un método constructivo que mezcla la utilización de unidades menores como ladrillos, bloques y piedras, las cuales se unen mediante un mortero o argamasa que sirve como material adherente. El ensamble de estos materiales genera un nuevo material compuesto, cuyas propiedades, si bien dependen de sus materiales constitutivos, suelen ser más complejos que un simple promedio de estas, debido a la interacción entre sus componentes.

Una de las principales propiedades de la albañilería desde el punto de vista del diseño de estructuras, es la resistencia básica a la compresión (f'_m). En palabras simples, esta es la capacidad máxima que posee un espécimen para soportar cargas de compresión. La determinación de este parámetro en Chile se realiza en base a una metodología descrita en la norma NCh 2123 Of 2003 [1]. En esta norma se estipula que la resistencia básica a la compresión (f'_m) se consigue a través de ensayos del tipo destructivos, específicamente a través de prismas construidos bajo las mismas condiciones y con los mismos materiales utilizados para la construcción de los muros, o bien, a través de muestras extraídas directamente de la estructura a analizar.

Los ensayos del tipo destructivos (DT) se emplean para el estudio de materiales. Se busca conocer el comportamiento de estos. Para ello el material estudiado se somete a ensayos de resistencia estandarizados, como por ejemplo el ensayo de flexión, el ensayo de compresión, entre otros, con el fin de lograr su caracterización [2].

Por su parte, los ensayos no destructivos (NDT) tiene como objetivo principal no dañar las propiedades mecánicas, físicas o químicas del objeto estudiado, dejándolo en condiciones óptimas para su futura utilización. Algunos de los NDT más utilizados en la actualidad son ensayos de radiografía industrial, ensayos de líquidos penetrantes, ensayos de ultrasonido, entre otros [3].

Dentro de lo que es la albañilería, se han realizado varios ensayos no destructivos con el fin de caracterizar mecánicamente tanto los materiales involucrados como la estructura en sí.

Algunos de los métodos aplicados son el método de velocidad de pulso ultrasónico (UPV), el método del martillo Schmidt, el método ground-penetrating radar (GPR), entre otros.

Profundizando en los ensayos de ultrasonido, estos se basan en la normativa americana ASTM - C597 [4]. En esta se describe el método UPV como el cálculo de la velocidad en la cual una onda se transmite dentro de un material. Las ondas son generadas por un transductor electroacústico y percibidas por un transductor receptor, estos deben estar en contacto con la superficie a estudiar. Finalmente, para el cálculo de la velocidad de propagación, se dividirá la distancia a la cual están dispuestos los transductores entre el tiempo de viaje de la onda otorgada por el instrumento.

Una de las aplicaciones de este método es en uno de los materiales más utilizados para el ensamble de muros, el mortero. Del Río et al. [5] realizaron la caracterización de probetas cilíndricas de mortero mediante el método UPV. Ellos ensayaron 26 especímenes con distintas dosificaciones. Finalmente, concluyeron que la relación de la resistencia máxima a la compresión y la velocidad de propagación de la onda ultrasónica medida en las tapas del cilindro varía de forma exponencial según disminuye la relación agua/cemento.

Por su parte, Maldonado et al. [6] realizaron experimentos a diferentes edades de fraguado y con distintas dosificaciones de agua/mortero. Confeccionaron 5 set de 18 probetas las cuales fueron expuestas al método UPV a una edad de maduración de 1, 7, 14, 21 y 28 días. Concluyeron que la relación agua/cemento es preponderante para las velocidades que puede alcanzar la onda dentro del medio que se propaga, demostrando una relación directa entre la resistencia a la compresión y los resultados del método UPV independiente de la dosificación.

En la misma línea, Aliabdo y Elmoaty [7] realizaron un estudio para la validación del método UPV, en el analizaron diferentes tipos de rocas y ladrillos para determinar qué tan fiel era la estimación de la resistencia a la compresión arrojada por el método en cuestión, obteniendo resultados similares al realizar la comparativa de la resistencia a compresión calculada por ambos métodos (DT y NDT). A su vez Vasanelli et al. [8] utilizaron el método UPV para la caracterización de un tipo de roca (calcarentas) muy utilizada en muros de albañilería en ciudades del sur de Italia.

Los métodos no destructivos también han sido utilizados para analizar las propiedades de distintos monumentos históricos. Bajo ese concepto, Sykora et al. [9] sometieron diversas estructuras a ensayos no destructivos y en función de estos determinar la resistencia a la compresión del monumento. Algunas de sus conclusiones son que, para un ensayo no destructivo, son necesarias como mínimo 20 mediciones de cara a la confiabilidad de los datos, además de calibrar el modelo propuesto para el cálculo de la resistencia con 2 o más ensayos destructivos.

Todo lo anterior demuestra que este método está ampliamente validado en materiales homogéneos. Sin embargo, para materiales o estructuras heterogéneas, como el caso de la albañilería, el horizonte de conocimiento en torno al método UPV es muy limitado. Solo existen algunos antecedentes, como el entregado por el estudio Monteagudo et al. [10] en la cual mostraron que la carga de rotura de prismas de albañilería alcanza valores mayores a medida que el espesor de la junta es menor.

Es justamente esta falta de información la motivación principal de esta investigación. Es importante expandir el conocimiento acerca del comportamiento de los métodos no destructivos y su validez para la predicción de las propiedades de materiales heterogéneos.

Es por esto que el objetivo principal de la presente investigación es lograr la caracterización mecánica de ladrillos y prismas de albañilería, utilizando el método de velocidad de pulso ultrasónico, con el fin de ampliar el rango de conocimiento acerca de este tipo de ensayos en materiales y estructuras heterogéneas.

2. Metodología

Como se mencionó anteriormente, el principal objetivo de esta investigación es estimar mediante el método de velocidad de pulso ultrasónico las propiedades mecánicas, tales como, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad en distintos elementos.

Para esto se realizaron mediciones de UPV sobre especímenes de mortero, ladrillo y prismas de albañilería, los que a su vez fueron también ensayados de forma destructiva siguiendo los métodos tradicionales especificados por las normas [11] [12] para determinar las propiedades mecánicas de los materiales.

En la Tabla 1 se presentan algunas observaciones de las mediciones realizadas, además del N° de elementos y N° de mediciones totales.

Tabla 1. Matriz de ensayos de mediciones UPV realizadas

	N° de elementos	N° de mediciones	Observaciones
Mortero	6	30	Las mediciones se realizaron mediante medición directa y se realizaron 10 por cada elemento. Para Probetas de Mortero se utilizaron 2 dosificaciones distintas D1 y D2.
Ladrillos cerámicos	36	360	Se realizaron 10 mediciones por elemento, Para ladrillos las mediciones se reparten en ladrillos pulidos y refrentados.
Prismas de albañilería	36	1620	En este caso se realizaron 3 posiciones de medición de manera longitudinal, transversal solo en ladrillo y transversal en la junta mortero/ladrillo. Para cada posición se midieron 15 velocidades.

En primer lugar, se ensayó un set de 6 probetas de mortero de dimensiones 16 x 4 x 4 [cm] siguiendo el procedimiento descrito en la norma NCh 158 Of 1967 [12]. Estas fueron fabricadas utilizando un mortero de pega predosificado marca Topex, y utilizando 2 tipos de dosificaciones. En la primera se utilizó el procedimiento propuesto por el fabricante, esto es, añadir 3,75 litros de agua por cada saco (25 kg) de mezcla seca del mortero. A esta dosificación le llamamos D1. En la segunda dosificación, se reemplazó un 20% de la mezcla de mortero por arena, a fin de reducir su resistencia y evaluar la influencia de esta en la determinación de la resistencia mediante UPV. Esta dosificación fue denominada D2.

En ambos casos, la mezcla se realizó utilizando una mezcladora automática marca CONTROLS Modelo 65-L0005. Posteriormente, se vertió la mezcla en moldes estandarizados, dejándolos fraguar 24 horas antes de desmoldar. Luego se inició un proceso de curado por 28 días, sumergiendo las probetas en tinas de agua con cal.

Una vez cumplido el tiempo de curado, sobre las probetas de mortero se realizaron ensayos UPV. Para las mediciones UPV se utilizó el instrumento Pundit Lab. Básicamente, este equipo consta de dos transductores de ondas de ultrasonido, uno de emisión y otro de recepción. Estos son ubicados en las paredes del material a estudiar uno frente al otro, midiéndose la velocidad con que la onda se propaga en el medio de estudio. Este análisis no destructivo a través del método UPV, se realizó considerando el procedimiento establecido en ASTM – C597 [4].

Una vez realizadas estas mediciones, las probetas se ensayaron a compresión en una prensa de mortero marca CONTROLS, Modelo 65 – L11G2/C, siguiendo el proceso establecido en la norma NCh 158 Of 1967 [12].

En la Figura 1, Figura 2 y Figura 3 se aprecian tanto el mortero utilizado para la fabricación de probetas como los instrumentos para la realización de los ensayos.



Figura 1. Mortero pegador ladrillo.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 2. CONTROLS Model 65 – L11G2/C

Fuente. Elaboración propia.



Figura 3. CONTROLS Model 65-L0005

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 4 y Figura 5 se aprecian el equipo de ultrasonido utilizado y la referencia de medición directa.



Figura 4. Instrumento Pundit Lab junto con sus transductores.

Fuente. Elaboración propia.

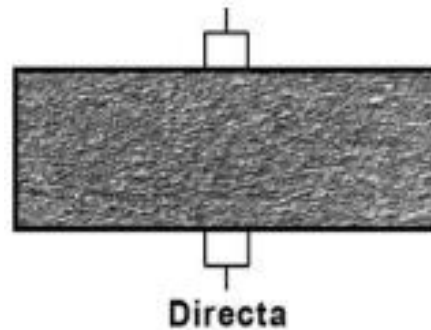


Figura 5. Referencia de medición de UPV en forma directa.

Fuente. Manual de operación, Pundit Lab [13].

Para el caso de los ladrillos, se seleccionó un set de 36 ladrillos artesanales macizos, a los cuales se les aplicó dos procesos distintos de preparación para el ensayo UPV. Por un lado, un conjunto de 18 ladrillos fue pulido para tener una superficie lisa que permita la ejecución del ensayo UPV, mientras que los otros 18 ladrillos fueron refrentados en un área tal que permita el mejor posicionamiento del emisor/receptor del equipo UPV. Nuevamente, la medición de UPV se realizó ciñéndose al procedimiento establecido en ASTM – C597 [4].

Luego de estas mediciones, se procedió a ensayar de forma destructiva los ladrillos siguiendo lo establecido en el apartado 4 de la norma NCh 167 Of 2001 [11].

Finalmente se realizaron ensayos sobre prisma de albañilería. Estos prismas fueron confeccionados según lo indicado en la NCh 167 Of 2001, [11] y consisten en 5 mitades de ladrillo apiladas y adosadas con una capa de mortero de 10 mm (Figura 6 y 7).



Figura 6. Set de prismas listos para ensayos destructivos.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 7. Vista en planta set de prismas de albañilería.

Fuente. Elaboración propia.

Se confeccionó un set de 36 prismas de albañilería, los cuales fueron fabricados con las distintas dosificaciones de mortero (D1 y D2). Para ambas dosificaciones se realizaron 18 prismas los cuales fueron refrentados tanto en las caras superior e inferior y en una pequeña área en las caras laterales para mejorar el contacto del emisor/receptor UPV.

En este set de prismas, se midió la velocidad de pulso ultrasónico de manera longitudinal (Figura 8) y transversal al prisma (Figura 9). En primera instancia se tomaron datos ubicando los transductores directamente sobre el ladrillo y posteriormente se repite el proceso ubicando los transductores en la junta generada entre el ladrillo y el mortero.

Luego de las mediciones UPV, los prismas son ensayados de forma destructiva siguiendo la metodología establecida en la norma NCh 158 Of 1967 [12].



Figura 8. Prismas sometidos a mediciones longitudinales.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 9. Prisma sometido a mediciones transversales.

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 10 y 11 se observa uno de los prismas de albañilería antes y después del ensayo de compresión.



Figura 10. Prisma de albañilería antes del ensayo de compresión.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 11. Prisma de albañilería después del ensayo de compresión.

Fuente. Elaboración propia.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los experimentos realizado en laboratorio.

3.1 Mortero

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las mediciones UPV para probetas de mortero confeccionadas con la dosificación D1. Para la dosificación D2, no se pudo realizar este ensayo, pues los especímenes estaban asociados a otro proyecto que no contemplaba este tipo de mediciones.

Tabla 2. Mediciones UPV en mortero para dosificación D1.

Mortero	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
<i>T. propagacion [μs]</i>	11,9	11,3	13,3
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	3385	3553	3012
<i>Nivel de confianza [%]</i>	100	100	100
<i>Coef. Pearson</i>	9%	7%	5%

Para la densidad de las probetas de mortero se registró el peso correspondiente a la unidad analizada. Además, el volumen de las probetas es 256 [cm³], ya que sus dimensiones son estandarizadas. Las mediciones obtenidas para la dosificación D1 se presentan en la Tabla 3 mientras que para la dosificación D2 se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3. Peso y densidad de las probetas de mortero para D1.

N° Probeta	Peso [g]	Densidad [g/cm³]
1	510	1,99
2	514	2,01
3	509	1,99

Tabla 4. Peso y densidad de las probetas de mortero para D2.

N° Probeta	Peso [g]	Densidad [g/cm³]
1	551	2,15
2	554	2,16
3	538	2,10

Luego, es posible realizar una correlación entre UPV y la densidad, tal como se ilustra en la Figura 12.

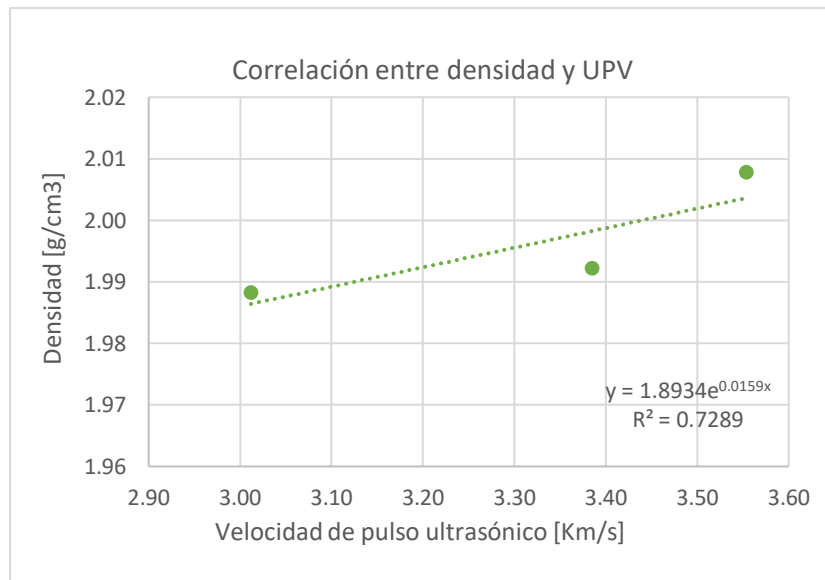


Figura 12. Curva de correlación para densidad para dosificación D1.

Así, el modelo propuesto para la determinación de la densidad a través de mediciones UPV se presenta en la Ec.1.

$$\rho = 1,89 * e^{0,016*UPV} \quad \text{Ec. 1}$$

$$R^2 = 0,73$$

donde

$$\rho = \text{Densidad del ladrillo} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$upv = \text{velocidad de pulso ultrasónico} \left[\frac{Km}{s} \right]$$

Para la estimación del módulo de elasticidad en probetas de mortero mediante mediciones UPV, se utilizó la Ec. 2 [14] Para el cálculo es necesario conocer la densidad de la probeta de mortero (ρ) y el coeficiente de Poisson (μ) asociado a los mismos, como este parámetro no fue medido en laboratorio, por la imposibilidad de medir la velocidad de las ondas de corte (V_s), es que se adoptó el valor de $\mu = 0,2$ propuesto por diversos autores [15].

$$E_d = \frac{\rho * upv^2 * (1 - \mu) * (1 - 2 * \mu)}{1 - \mu} \quad \text{Ec. 2}$$

Luego, existe una relación entre el módulo de elasticidad y las mediciones UPV la cual se presenta en la Figura 13.

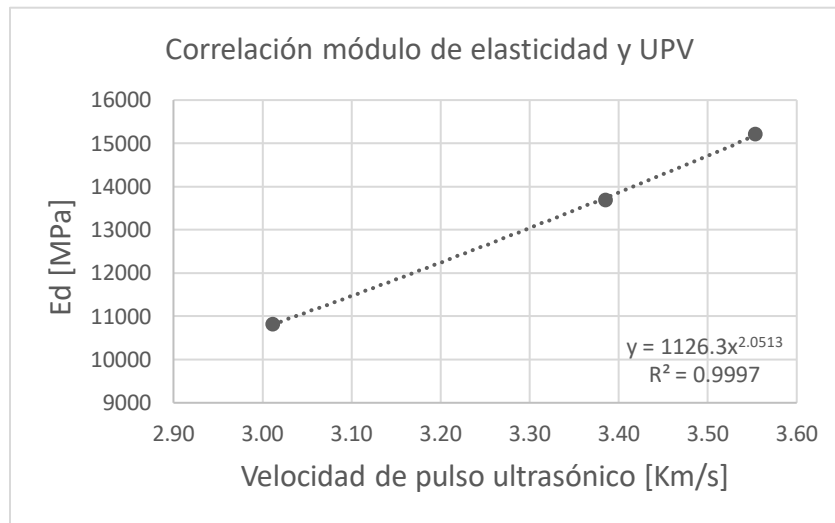


Figura 13. Curva de correlación entre UPV y el módulo de elasticidad dinámico para dosificación D1.

Así, el modelo propuesto para la estimación del módulo de elasticidad dinámico para probetas de mortero se presenta en la Ec. 3 junto con su coeficiente de correlación.

$$E_d = 1126,3 * UPV^{2,05} \quad \text{Ec. 3}$$

$$R^2 = 0,999$$

donde

$E_d = \text{Módulo de elasticidad dinámico [MPa]}$

$upv = \text{velocidad de pulso ultrasónico } \left[\frac{Km}{s}\right]$

Finalmente, las probetas de mortero fueron sometidas a ensayos destructivos, el procedimiento fue tal y como lo dicta la NCh 158 Of 2001 [12].

En la Tabla 5 y 6 se aprecian los resultados de los ensayos destructivos de las probetas de mortero para cada dosificación.

Tabla 5. Resistencia a compresión en probetas de mortero para dosificación D1.

Probeta	Peso [Kg]	Carga puntual mitad 1 [Ton]	Carga dist. mitad 1 [Mpa]	Peso mitad 1 [Kg]
1	0,510	1,512	9,27	0,269
2	0,509	1,523	9,34	0,255
3	0,514	1,408	8,63	0,262
		Carga puntual mitad 2 [Ton]	Carga dist. mitad 2 [Mpa]	Peso mitad 2 [Kg]
		1,644	10,08	0,241
		1,625	9,96	0,254
		1,478	9,06	0,252

Tabla 6. Resistencia a compresión en probetas de mortero para dosificación D2.

Probeta	Peso [Kg]	Carga puntual mitad 1 [Ton]	Carga dist. mitad 1 [Mpa]	Peso mitad 1 [Kg]
1	0,551	1,016	6,23	0,272
2	0,554	1,223	7,50	0,249
3	0,538	1,236	7,58	0,261
		Carga puntual mitad 2 [Ton]	Carga dist. mitad 2 [Mpa]	Peso mitad 2 [Kg]
		1,001	6,14	0,279
		1,209	7,41	0,301
		1,231	7,55	0,279

Finalmente, tras el procesamiento de los datos obtenidos, se presentan en la Tabla 7 los promedios de la resistencia a la compresión [MPa] de las probetas, así como la carga puntual [T] que lograron soportar.

Tabla 7. Promedio de resultados de resistencia a compresión para ambas dosificaciones.

Dosificación	Carga puntual [Ton]	Carga distribuida [Mpa]
D1	1,53	9,39
D2	1,15	7,07

Con los datos proporcionados por las Tablas 2 y 5 es posible establecer una correlación entre variables, la cual permite predecir el valor de la resistencia a la compresión para distintas mediciones de UPV. (Figura 14)

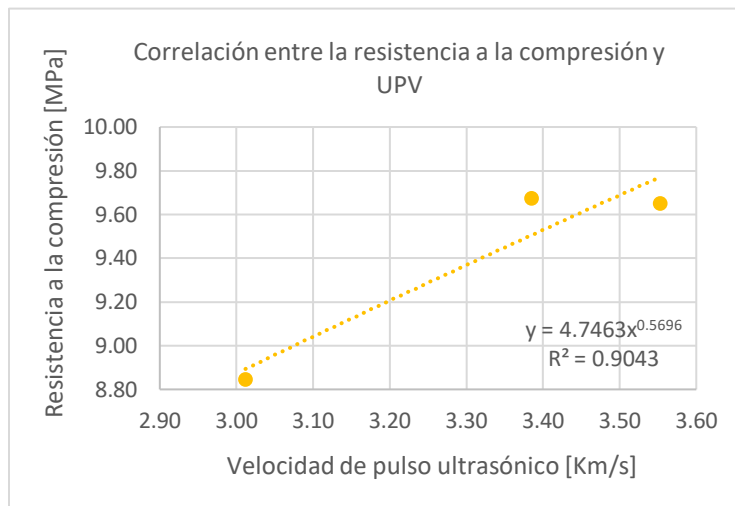


Figura 14. Curva de correlación entre UPV y resistencia a compresión para dosificación D1.

Es así como se obtiene la Ec. 4, propuesta para la caracterización de la resistencia a la compresión en probetas de mortero.

$$f'_c = 4,74 * upv^{0,57} \quad \text{Ec. 4}$$

$$R^2 = 0,90$$

donde

$f'_c =$ Resistencia a la compresión [MPa]

$upv =$ velocidad de pulso ultrasónico $\left[\frac{Km}{s}\right]$

Luego, mediante la ecuación característica para probetas de morteros y los datos presentados en la Tabla 6, se pueden estimar las velocidades de pulso ultrasónico para la dosificación D2 estos datos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Velocidades de pulso ultrasónico para D2.

N° Probeta	UPV [Km/s]
1	1,59
2	2,22
3	2,27

Así, la curva de tendencia generada con datos de ambas dosificaciones se presenta en la Figura 15.

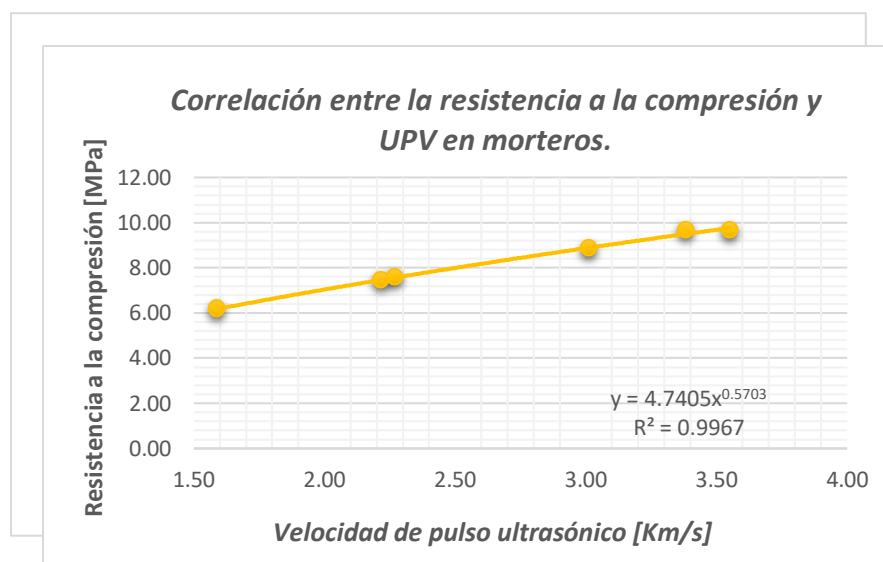


Figura 15. Curva de correlación entre UPV y resistencia a compresión para dosificación D1 y D2.

3.2 Ladrillos

En la Tabla 9 se presenta el tiempo de viaje de la onda [μ s], la velocidad promedio que esta alcanza dentro del material [m/s], el nivel de confianza arrojado por el instrumento de medición [%] y un coeficiente de correlación aplicado al tiempo de viaje de la onda de los ladrillos previamente pulidos. En la Tabla 10 se presentan los mismos datos para ladrillos refrentados. Finalmente, en la Tabla 11 se consolidan los resultados.

Si bien ambas mediciones son igual de aceptables, cada una tiene aspectos distintivos. En ladrillos pulidos se observa un menor tiempo de propagación de la onda y los datos presentan una mayor dispersión entre ellos, mientras que en ladrillos refrentados se aprecia un mayor tiempo de propagación, pero sus datos se encuentran más compactos en torno a su media.

Para el experimento posterior se seleccionó el set de ladrillos refrentados debido a la poca dispersión de datos presente y por el nivel de confianza en las mediciones que entrego el instrumento de medición.

Tabla 9. Promedios de los datos UPV obtenidos por medición directa en ladrillos pulidos.

LADRILLOS PULIDOS	Ladrillo 1	Ladrillo 2	Ladrillo 3	Ladrillo 4	Ladrillo 5	Ladrillo 6	Ladrillo 7	Ladrillo 8	Ladrillo 9
T. propagacion [μ s]	46	42	43	43	41	49	47	44	45
Vel. Promedio [m/s]	919	961	899	1045	988	840	926	1006	920
Nivel de confianza [%]	81	69	90	88	88	89	100	93	99
Coef. Pearson	5%	6%	10%	9%	7%	6%	6%	5%	5%
	Ladrillo 10	Ladrillo 11	Ladrillo 12	Ladrillo 13	Ladrillo 14	Ladrillo 15	Ladrillo 16	Ladrillo 17	Ladrillo 18
	43	47	41	43	48	51	42	47	40
	971	961	1053	987	905	845	988	855	999
	100	98	97	99	99	93	96	99	99
	4%	3%	6%	3%	4%	5%	3%	4%	3%

Tabla 10. Promedios de los datos UPV obtenidos por medición directa en ladrillos refrentados.

LADRILLOS REFRENTADOS	Ladrillo 1	Ladrillo 2	Ladrillo 3	Ladrillo 4	Ladrillo 5	Ladrillo 6	Ladrillo 7	Ladrillo 8	Ladrillo 9
T. propagacion [μs]	51	45	43	52	53	44	43	50	55
Vel. Promedio [m/s]	881	960	938	878	808	868	1028	913	824
Nivel de confianza [%]	100	100	100	100	100	100	100	100	99
Coef. Pearson	3%	2%	2%	2%	3%	2%	2%	2%	1%
	Ladrillo 10	Ladrillo 11	Ladrillo 12	Ladrillo 13	Ladrillo 14	Ladrillo 15	Ladrillo 16	Ladrillo 17	Ladrillo 18
	53	54	48	50	47	47	49	41	42
	767	840	902	825	901	878	872	926	925
	100	100	97	100	99	93	96	99	99
	1%	3%	1%	4%	1%	2%	4%	3%	2%

Tabla 11. Condensación de datos UPV para ambos métodos de análisis.

LADRILLOS	Refrentados	Pulidos
T. propagacion [μs]	48	44
Vel. Promedio [m/s]	885	948
Nivel de confianza [%]	99	93
Coef. Pearson	2%	5%

A través de este proceso de toma de datos es que se logran caracterizar los ladrillos mediante mediciones UPV de la siguiente manera.

Para la densidad de cada uno de los elementos de ladrillo se registró el peso correspondiente a la unidad analizada, además se generalizaron las dimensiones de los ladrillos a una medida de 28 x 14 x 5 [cm]. Las mediciones obtenidas se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Peso y densidad de los elementos del set de ladrillos.

N° Ladrillo	Peso [g]	Densidad [g/cm³]
1	2958	3,02
2	3163	3,39
3	2991	3,26
4	2902	3,34
5	2811	3,59
6	2888	3,06
7	3263	4,50
8	2935	2,81
9	2819	3,83
10	2796	3,16
11	2838	3,11
12	2942	2,91
13	2856	3,03
14	2920	3,28
15	2890	2,96
16	2830	3,15
17	3211	3,70
18	3132	3,57

Luego, es posible establecer una correlación entre estos dos parámetros, mediante los datos presentados en la Tabla 10 y 12, tal como se ilustra en la Figura 16.

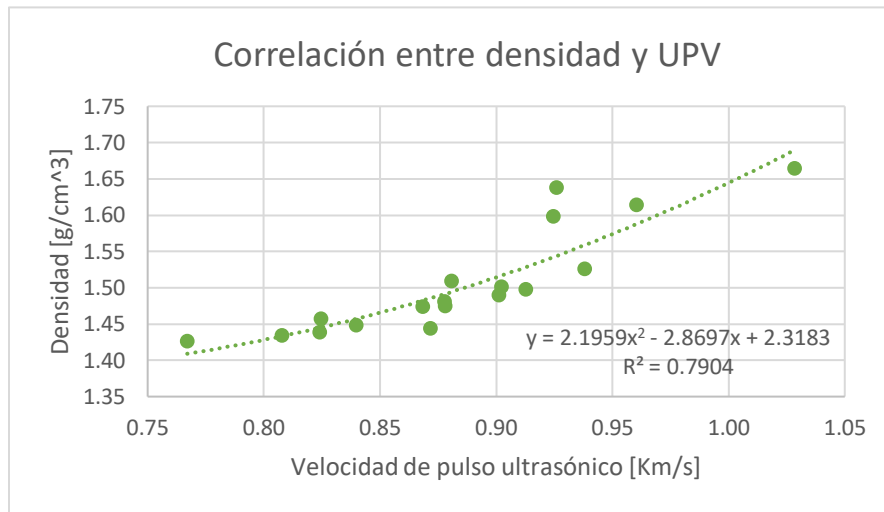


Figura 16. Curva de correlación entre UPV y la densidad de ladrillos cerámicos.

Así, el modelo propuesto para la determinación de la densidad a través de mediciones UPV se presenta en la Ec.5.

$$\rho = 2,19 * upv^2 - 2,87 * upv + 2,32 \quad \text{Ec. 5}$$

$$R^2 = 0,79$$

donde

$$\rho = \text{Densidad del ladrillo} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$upv = \text{velocidad de pulso ultrasónico} \left[\frac{Km}{s} \right]$$

Al igual que para el caso de las probetas de mortero, el valor del módulo de Poisson no fue calculado en laboratorio. Sin embargo, basado en la literatura existente se adoptó el valor de $\mu = 0,18$ propuesto por diversos autores [16] [17].

Luego, existe una relación entre el módulo de elasticidad y las mediciones UPV. En la Figura 17 se observa la curva de estimación del módulo de elasticidad dinámico aplicado a ladrillos cerámicos macizos.

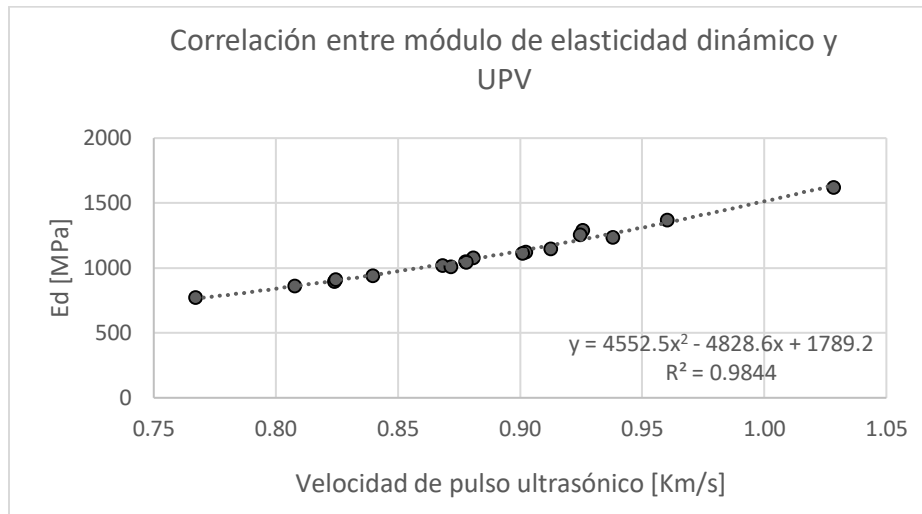


Figura 17. Curva de correlación entre UPV y el módulo de elasticidad dinámico para ladrillos cerámicos.

Así, el modelo propuesto se presenta en la Ec. 6 junto con su coeficiente de correlación.

$$E_d = 4552,5 * upv^2 - 4828,6 * upv + 1789,2 \quad \text{Ec. 6}$$

$$R^2 = 0,98$$

donde

$E_d =$ Módulo de elasticidad dinámico [MPa]

$upv =$ velocidad de pulso ultrasónico $\left[\frac{Km}{s}\right]$

Finalmente, el set de ladrillos refrentados fue sometido a ensayos destructivos, el procedimiento fue tal y como lo dicta la NCh 167 Of 2001. Sometimiento a esfuerzo normal con una velocidad de carga no mayor a 20 MPa/min [11].

En la Tabla 13 se aprecian los datos obtenidos para cada probeta ensayada en laboratorio.

Con los datos proporcionados por las Tablas 10 y 13 es posible establecer una correlación entre variables, la cual permite predecir el valor de la resistencia a la compresión para distintas mediciones de UPV. Tal como se ilustra en la Figura 18.

Tabla 13. Resultados ensayo destructivo en ladrillos refrentados.

N° Ladrillo	Carga Puntual [Ton]	Carga Distribuida [kg/cm ²]	Carga Distribuida [MPa]
1	12,49	30,76	3,02
2	14,03	34,56	3,39
3	13,51	33,28	3,26
4	13,83	34,06	3,34
5	14,87	36,63	3,59
6	12,68	31,23	3,06
7	18,63	45,89	4,50
8	11,63	28,65	2,81
9	15,87	39,09	3,83
10	13,07	32,19	3,16
11	12,89	31,75	3,11
12	12,05	29,68	2,91
13	12,56	30,94	3,03
14	13,58	33,45	3,28
15	12,23	30,12	2,96
16	13,03	32,09	3,15
17	15,31	37,71	3,70
18	14,78	36,40	3,57

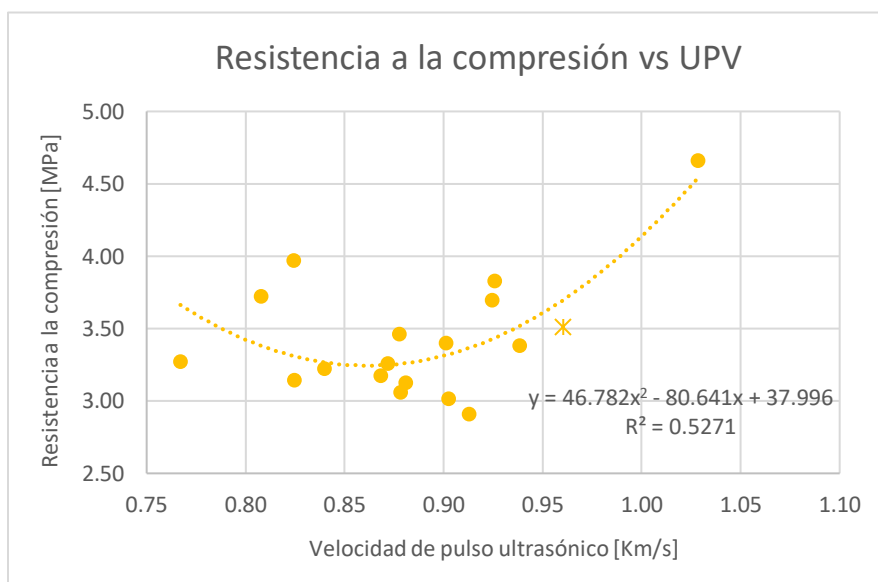


Figura 18. Curva de correlación entre UPV y la resistencia a compresión para ladrillos cerámicos.

Es así como se obtiene la Ec. 7, propuesta para la caracterización de la resistencia a la compresión en ladrillos macizos refrentados.

$$f'_c = 46,78 * upv^2 - 80,641 * upv + 37,996 \quad \text{Ec. 7}$$

$$R^2 = 0,53$$

donde

$f'_c = \text{Resistencia a la compresión [MPa]}$

$upv = \text{velocidad de pulso ultrasónico } \left[\frac{Km}{s}\right]$

3.3 Prismas de albañilería

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de los materiales trabajando como una unidad de albañilería.

Para comenzar el trabajo se construyó un set de 18 prismas para la dosificación D1, este set fue ensayado de forma no destructiva, utilizando el método UPV. Se realizaron mediciones tanto de forma longitudinal como transversal. Los resultados de estas mediciones se exponen de la Tabla 14 a la Tabla 16.

Tabla 14. Mediciones UPV para prismas de albañilería con D1 y en posición longitudinal.

<i>Sección longitudinal</i>	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Prisma 4	Prisma 5	Prisma 6	Prisma 7	Prisma 8	Prisma 9
<i>T. propagacion [μs]</i>	335	347	347	340	334	339	330	341	328
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	885	879	859	887	828	861	841	888	909
<i>Nivel de confianza [%]</i>	4	1	1	2	6	3	4	4	6
<i>Coef. Pearson</i>	4%	0%	0%	9%	4%	6%	3%	4%	4%
	Prisma 10	Prisma 11	Prisma 12	Prisma 13	Prisma 14	Prisma 15	Prisma 16	Prisma 17	Prisma 18
	362	323	325	316	340	295	0	0	0
	808	926	892	923	853	993	0	0	0
	6	3	5	3	5	4	0	0	0
	4%	4%	5%	4%	5%	3%	0%	0%	0%

Tabla 15. Mediciones UPV para prismas de albañilería con D1 y en posición transversal solo en ladrillos.

<i>S. transversal (Ladrillo)</i>	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Prisma 4	Prisma 5	Prisma 6	Prisma 7	Prisma 8	Prisma 9
<i>T. propagacion [μs]</i>	113	79	128	54	61	58	117	63	76
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	1260	1821	1126	2698	2470	2524	1421	2226	1873
<i>Nivel de confianza [%]</i>	5	4	18	12	6	11	11	7	3
<i>Coef. Pearson</i>	7%	12%	21%	11%	18%	11%	38%	13%	20%
	Prisma 10	Prisma 11	Prisma 12	Prisma 13	Prisma 14	Prisma 15	Prisma 16	Prisma 17	Prisma 18
	74	67	110	60	69	52	0	0	0
	2025	2217	1354	2399	2139	2778	0	0	0
	4	6	8	6	7	8	0	0	0
	17%	16%	16%	13%	11%	4%	0%	0%	0%

Tabla 16. Mediciones UPV para prismas de albañilería con D1 y en posición transversal en junta ladrillo/mortero.

<i>S. transversal (Junta)</i>	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Prisma 4	Prisma 5	Prisma 6	Prisma 7	Prisma 8	Prisma 9
<i>T. propagación [μs]</i>	45	46	45	47	44	46	45	43	44
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	3187	3051	3049	3065	3337	3123	3231	3180	3116
<i>Nivel de confianza [%]</i>	100	100	94	99	97	100	100	94	97
<i>Coef. Pearson</i>	6%	2%	7%	2%	5%	2%	2%	2%	2%
	Prisma 10	Prisma 11	Prisma 12	Prisma 13	Prisma 14	Prisma 15	Prisma 16	Prisma 17	Prisma 18
	45	45	46	46	44	40	0	0	0
	3310	3242	3133	3110	3288	3550	0	0	0
	100	100	98	100	100	98	0	0	0
	5%	4%	3%	2%	2%	1%	0%	0%	0%

De igual manera, se construyó un set de 18 prismas para la D2, este set fue expuesto a ensayos no destructivos, utilizando el método UPV, se realizaron mediciones tanto de forma longitudinal como transversal. Los resultados de estas mediciones se exponen en la Tabla 17 a Tabla 19.

Tabla 17. Mediciones UPV para prismas de albañilería con D2 y en posición longitudinal.

<i>Sección longitudinal</i>	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Prisma 4	Prisma 5	Prisma 6	Prisma 7	Prisma 8	Prisma 9
<i>T. propagación [μs]</i>	325	248	281	313	347	290	299	314	298
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	1004	1306	1131	1009	909	990	1057	947	1011
<i>Nivel de confianza [%]</i>	3	2	2	12	4	6	11	5	4
<i>Coef. Pearson</i>	15%	5%	5%	10%	5%	6%	9%	4%	10%
	Prisma 10	Prisma 11	Prisma 12	Prisma 13	Prisma 14	Prisma 15	Prisma 16	Prisma 17	Prisma 18
	292	292	360	332	319	316	330	328	324
	1053	1069	876	922	915	887	926	887	937
	4	4	3	4	4	3	5	3	3
	5%	8%	14%	15%	4%	4%	4%	6%	5%

Tabla 18. Mediciones UPV para prismas de albañilería con D2 y en posición transversal solo en ladrillos.

<i>S. transversal (Ladrillo)</i>	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Prisma 4	Prisma 5	Prisma 6	Prisma 7	Prisma 8	Prisma 9
<i>T. propagación [μs]</i>	55	58	56	69	66	66	54	70	69
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	3028	2600	2833	2240	2419	2308	2802	2252	2245
<i>Nivel de confianza [%]</i>	74	9	10	11	10	24	24	11	4
<i>Coef. Pearson</i>	11%	10%	13%	19%	18%	13%	7%	14%	25%
	Prisma 10	Prisma 11	Prisma 12	Prisma 13	Prisma 14	Prisma 15	Prisma 16	Prisma 17	Prisma 18
	63	56	53	117	57	69	60	77	77
	2406	2635	2850	1301	2609	2177	2469	1991	1997
	11	17	23	3	8	8	7	6	4
	15%	11%	6%	22%	14%	17%	27%	21%	17%

Tabla 19. Mediciones UPV para prismas de albañilería con D2 y en posición transversal en junta ladrillo/mortero.

<i>S. transversal (Junta)</i>	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Prisma 4	Prisma 5	Prisma 6	Prisma 7	Prisma 8	Prisma 9
<i>T. propagación [μs]</i>	49	45	43	48	48	56	50	56	47
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	3337	3309	3615	3141	3131	2690	3026	2748	3145
<i>Nivel de confianza [%]</i>	100	100	100	97	99	100	98	100	95
<i>Coef. Pearson</i>	2%	1%	2%	2%	4%	2%	3%	2%	2%
	Prisma 10	Prisma 11	Prisma 12	Prisma 13	Prisma 14	Prisma 15	Prisma 16	Prisma 17	Prisma 18
	47	46	45	49	47	49	43	48	50
	3118	3214	3326	2935	3103	3007	3272	3056	3025
	100	99	98	100	100	95	100	100	94
	1%	2%	2%	2%	2%	4%	3%	2%	3%

Finalmente, en la Tabla 20 y 21 se presentan los promedios del conjunto de datos tanto para la D1 como para D2. En ambos casos se aprecia que las mediciones responden de mejor manera al evaluarlas en la posición transversal de la probeta y ubicando los transductores en la junta ladrillo/mortero, pues el nivel de confianza otorgado por el instrumento de medición es claramente superior. En lo que sigue, se trabajará con los resultados de las mediciones transversales en la junta ladrillo/mortero, pues se tiene en dicho caso niveles de confianza superior al 75 % [13].

Tabla 20. Promedio de las mediciones UPV para D1 realizadas en las 3 ubicaciones.

<i>Sección</i>	<i>Longitudinal</i>	<i>Transversal (ladrillo)</i>	<i>Transversal (Junta)</i>
<i>T. propagación [μs]</i>	333	87	45
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	882	1868	3198
<i>Nivel de confianza [%]</i>	4	7	99
<i>Coef. Pearson</i>	4%	16%	3%

Tabla 21. Promedio de las mediciones UPV para D2 realizadas en las 3 ubicaciones.

<i>Sección</i>	<i>Longitudinal</i>	<i>Transversal (ladrillo)</i>	<i>Transversal (Junta)</i>
<i>T. propagación [μs]</i>	312	66	48
<i>Vel. Promedio [m/s]</i>	991	2398	3122
<i>Nivel de confianza [%]</i>	5	15	99
<i>Coef. Pearson</i>	7%	15%	2%

Para la densidad de los prismas de albañilería se registró el peso correspondiente a la unidad analizada, además se generalizaron las dimensiones de los prismas a una medida de 14 x 14 x 30 [cm]. Las mediciones obtenidas se presentan en la Tabla 22 y Tabla 23.

Tabla 22. Peso y densidad de los prismas de albañilería con dosificación D1.

<i>N° Ladrillo</i>	<i>Peso [g]</i>	<i>Densidad [g/cm3]</i>
1	10710	1,80
2	10193	1,71
3	10924	1,84
4	10470	1,76
5	11300	1,90
6	10749	1,81
7	11128	1,87
8	10960	1,84
9	10554	1,77
10	11133	1,87
11	11148	1,87
12	10833	1,82
13	10872	1,83
14	10786	1,81
15	11319	1,90
16	10364	1,74
17	10297	1,73
18	10192	1,71

Tabla 23. Peso y densidad de los prismas de albañilería con dosificación D2.

<i>N° Ladrillo</i>	<i>Peso [g]</i>	<i>Densidad [g/cm3]</i>
1	10710	1,80
2	10193	1,71
3	10924	1,84
4	10470	1,76
5	11300	1,90
6	10749	1,81
7	11128	1,87
8	10960	1,84
9	10554	1,77
10	11133	1,87
11	11148	1,87
12	10833	1,82
13	10872	1,83
14	10786	1,81
15	11319	1,90
16	10364	1,74
17	10297	1,73
18	10192	1,71

Luego, es posible realizar una correlación entre estos dos parámetros para ambas dosificaciones, tal como se ilustra en las Figuras 19 y 20.

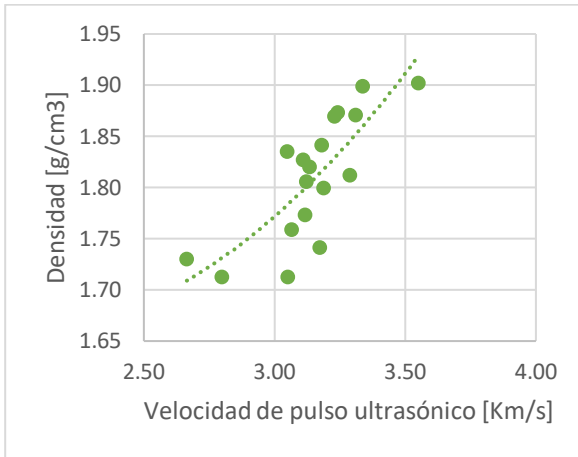


Figura 19. Curva de correlación entre UPV y densidad para prismas con mortero D1

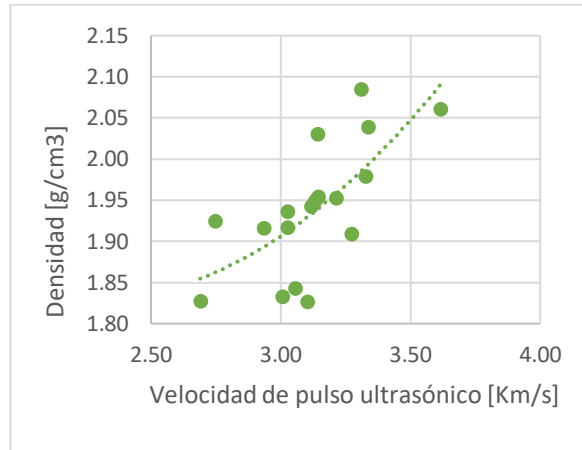


Figura 20. Curva de correlación entre UPV y densidad para prismas con mortero D2

Así, los modelos propuestos para la determinación de la densidad a través de mediciones UPV se presentan en la Ecs. 8 y 9, respectivamente.

$$\rho = 0,11 * upv^2 - 0,44 * upv + 2,097 \quad \text{Ec. 8}$$

$$R^2 = 0,62$$

$$\rho = 0,144 * upv^2 - 0,65 * upv + 2,57 \quad \text{Ec. 9}$$

$$R^2 = 0,48$$

donde

$$\rho = \text{Densidad del prisma de albañilería} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$upv = \text{velocidad de pulso ultrasónico} \left[\frac{Km}{s} \right]$$

Una vez realizados los ensayos no destructivos para ambas dosificaciones D1 y D2, se procede a someter a los prismas de albañilería a ensayos destructivos para obtener su resistencia a la compresión. En la Tabla 24 y Tabla 25 se presentan los valores registrados de dichos ensayos

Tabla 24. Resultados ensayos destructivos para D1.

N° Ladrillo	Carga Puntual [Ton]	Carga Distribuida [kg/cm²]	Carga Distribuida [MPa]
1	5,21	26,58	2,61
2	5,15	26,28	2,58
3	4,78	24,39	2,39
4	4,39	22,40	2,20
5	5,34	27,24	2,67
6	4,64	23,67	2,32
7	6,55	33,42	3,28
8	4,76	24,29	2,38
9	4,80	24,49	2,40
10	4,72	24,08	2,36
11	4,24	21,63	2,12
12	4,94	25,20	2,47
13	5,90	30,10	2,95
14	6,76	34,49	3,38
15	6,37	32,50	3,19
16	4,45	22,70	2,23
17	4,34	22,14	2,17
18	4,40	22,45	2,20

Tabla 25. Resultados ensayos destructivos para D2.

N° Ladrillo	Carga Puntual [Ton]	Carga Distribuida [kg/cm²]	Carga Distribuida [MPa]
1	4,82	24,59	2,41
2	6,08	31,02	3,04
3	6,61	33,72	3,31
4	4,35	22,19	2,18
5	3,94	20,10	1,97
6	5,15	26,28	2,58
7	4,71	24,03	2,36
8	5,48	27,96	2,74
9	4,81	24,54	2,41
10	5,32	27,14	2,66
11	3,74	19,08	1,87
12	4,20	21,43	2,10
13	6,15	31,38	3,08
14	4,19	21,38	2,10
15	4,48	22,86	2,24
16	4,61	23,52	2,31
17	3,44	17,55	1,72
18	4,01	20,46	2,01

De igual manera y con la información proporcionada por la Tabla 16, Tabla 19, Tabla 24 y Tabla 25 es posible generar una relación entre variables las cuales se presentan en la Figura 21 y Figura 22.

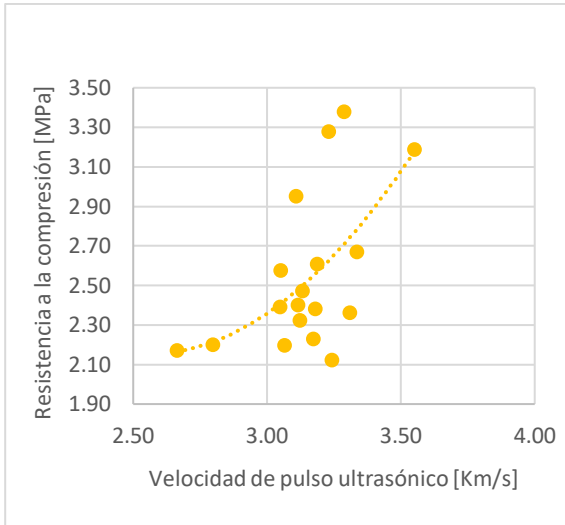


Figura 21. Curva de correlación entre UPV y resistencia a compresión para prismas con mortero D1

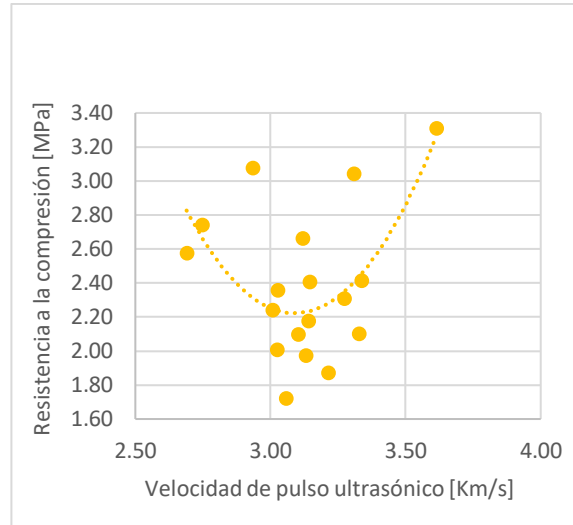


Figura 22. Curva de correlación entre UPV y resistencia a compresión para prismas con mortero D2

En la Figura 21 y Figura 22 se presentan los modelos propuestos para ambas dosificaciones, a continuación, se presentan las ecuaciones características obtenidas.

En primer lugar, para la dosificación D1 el modelo propuesto se presenta en la Ec. 10, mientras que el modelo para la dosificación D2 se presenta en la Ec. 11.

$$f'_c = 1,039 * upv^2 - 5,317 * upv + 8,955 \quad \text{Ec. 10}$$

$$R^2 = 0,33$$

$$f'_c = 3,783 * upv^2 - 23,374 * upv + 38,329 \quad \text{Ec. 11}$$

$$R^2 = 0,39$$

donde

$f'_c =$ Resistencia a la compresión [MPa]

$upv =$ velocidad de pulso ultrasónico [$\frac{Km}{s}$]

4. Análisis de resultados

4.1 Mortero

En el caso de los morteros se observa una fuerte correlación entre la densidad y UPV, cercana al 75 %. Además, los valores para la densidad varían entre 1,9 y 2 [g/cm³]. En contraparte, Maldonado et al. [6] obtuvieron en sus resultados una correlación cercana al 70 % mientras que los valores de densidad variaron entre 1,9 y 2,2 [g/cm³].

Para el caso del módulo de elasticidad dinámico Maldonado et al. [6] obtuvieron valores entre 10000 y 19000 [MPa]. Mientras que en esta investigación ese rango disminuyó a 11000 y 16000 [MPa].

Para la resistencia a la compresión, en esta investigación los valores variaron entre 8,5 y 10 [MPa]. Para Maldonado et al. [6] los resultados variaron entre 8 y 11 [MPa]. Además, en ambas investigaciones la correlación entre variables ronda el 90 %.

Se observa gran similitud en los resultados, validando el procedimiento ejecutado y los resultados obtenidos

Para la comparación entre las dos dosificaciones de mortero se evidencia una disminución de 2,32 [MPa] en la resistencia a la compresión promedio, del mismo modo para la carga puntual resistida por la probeta se evidenció una reducción de 0,38 [Ton].

Comparando estos resultados con investigaciones realizadas por otros autores es posible detectar que la cantidad de áridos es una de las variables que más afectan a la resistencia a la compresión de las probetas de mortero [18][19].

4.2 Ladrillos

Para el caso de los ladrillos, la densidad varía entre 1,4 – 1,7 [g/cm³]. Para Villegas et al. [20] los valores de densidad varían entre 1,49 – 1,64 [g/cm³] obteniendo resultados similares entre estos estudios.

Sin embargo, otros autores coinciden en que los rangos aceptables varían entre 1,7 – 1,9 [g/cm³] [21]. Por lo que los valores obtenidos en este estudio están levemente por debajo de lo aceptable.

Para este estudio los valores del módulo de elasticidad oscilan entre 700 y 1600 [MPa], mientras que para Duarte et al. se mueven entre 600 y 1500 [MPa]. En ambos casos la variabilidad del dato de elasticidad es alta, además los mínimos y máximos registrados no distan tanto en la comparación final [22].

Para la resistencia a la compresión en el presente estudio se obtuvieron valores de alrededor de 3 – 4,5 [MPa]. Para Álvarez y Larsen [23] la resistencia mínima a la compresión para ladrillos cerámicos artesanales es de 4 MPa, por lo que existe una similitud en los datos obtenidos por ambos estudios.

Finalmente, se observa en que la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico, densidad y módulo de elasticidad es fuerte. Mientras que para la resistencia a la compresión es una correlación media lo que denota un alto grado de dispersión en los resultados obtenidos a través del modelo propuesto [24].

4.3 Prismas de albañilería

Para los prismas, la estimación de la densidad los coeficientes de correlación fueron de 62 y 48 % respectivamente. El modelo propuesto genera valores de densidad que difieren un poco de los valores reales de la densidad de los prismas.

La determinación del modelo para la estimación del módulo de elasticidad no se pudo realizar para los prismas de albañilería. Ya que para la utilización de las formulaciones propuestas por el British Standart [25] se realizan algunas consideraciones matemáticas dependiendo de las propiedades del material estudiado. Para dichas consideraciones se exige que el material estudiado se comporte como un sólido elástico isotrópico [14] lo cual no ocurre en los prismas de albañilería. Estos como son elementos compuestos, las variables que modifican sus propiedades son varias, lo que genera una complejidad mayor de cara al análisis de resultados, también los prismas se clasifican como elementos sólidos anisótropos, discontinuos y heterogéneos, lo que dificulta las mediciones UPV provocando una absorción y dispersión en el viaje de la onda [26].

Finalmente, para la resistencia a la compresión se esperaba que D1 presentara un desempeño superior a D2. Sin embargo, se esperaba una reducción aun mayor de la resistencia a la compresión del prisma. La reducción de la resistencia alcanzo un orden de 0,16 MPa.

Además, se observó una correlación débil entre las variables, esto quiere decir que la resistencia a la compresión se explica de mala manera dependiendo de las mediciones UPV.

5. Conclusiones

El principal objetivo de esta investigación fue el determinar las principales propiedades mecánicas de ladrillos cerámicos y estructuras desarrolladas en albañilería simple mediante el método de pulso ultrasónico. Y así ampliar el rango de conocimiento en torno a la aplicación y validez del método en elementos heterogéneos.

Es por esta razón que fue pertinente realizar el proceso de caracterización en los materiales que componen la albañilería simple para luego realizar un correcto análisis respecto de la validez del método en materiales heterogéneos.

Los especímenes ensayados en laboratorio fueron confeccionados bajo las normativas vigentes en Chile. Se sometieron a ensayos no destructivos mediante el método UPV para conocer la velocidad de propagación de una onda mecánica en el material estudiado. Luego se ensayaron a compresión para poder conocer los valores de resistencia a esta solicitud.

Por último, se analizaron los datos y se propuso, tanto los modelos predictivos para las propiedades mecánicas, como su validez a la hora de estimar resultados a partir de ellos.

1. Para el caso de morteros se aprecia que efectivamente la resistencia a la compresión en este material se ve mermada ante el aumento de la proporción de arena en su dosificación, este comportamiento se mantiene en los prismas de albañilería. Sin embargo, el orden de magnitud de la merma de resistencia es considerablemente menor en este caso.

2. Para el caso de los ladrillos, el método funciona de buena manera en algunas de las propiedades mientras que en otras no logra caracterizar óptimamente los resultados, es por esto que se concluye que si bien los modelos proporcionan una utilidad en algunos casos en general el método es discutible, debido a la variabilidad en la homogeneidad de los ladrillos estudiados.
3. Para el caso de los prismas de albañilería, si bien los modelos predictivos no reflejan del todo la realidad en cuanto a las propiedades del material, estos pueden ser calibrados y comparados con otros tipos de ensayos no destructivos para generar una corrección y reflejar de mejor manera los que realmente pasa con las propiedades de los elementos heterogéneos.

6. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por ANID/CONICYT en el marco del proyecto FONDECYT Iniciación 11200117.

7. Referencias

- [1] Nch 2123. (2003). “Albañilería confinada – Requisitos de diseño y cálculo”. Norma Chilena Oficial. PA.
- [2] Vallejo, T. (2016). “Análisis comparativo de ensayos destructivos y no destructivos de hormigones de alta resistencia”. Universidad de Guayaquil.
- [3] Rodríguez, X. (2019). “Ensayos físicos (2^a ed. Rev. Y ampl.)”. SINTESIS
- [4] ASTM C 597-16. Standard Test Method for Pulse Velocity Through concrete
- [5] L.M del Río, et al. (2004). “Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing”. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.053>.
- [6] Maldonado, E., Oyarzo, C., Carrillo, J. (2021). “Aplicación del método de velocidad de propagación de pulso ultrasónico para la determinación de propiedades mecánicas de morteros”. Tesis para habilitación profesional. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- [7] Aliabdo, Ali & Abd Elmoaty, Abd Elmoaty. (2012). “Reliability of using nondestructive tests to estimate compressive strength of building stones and bricks”. Alexandria Engineering Journal. 51. 193–203. 10.1016/j.aej.2012.05.004.
- [8] Vasanelli, E. *et al.* (2020) “A nondestructive testing method for masonry by using UPV and cross validation procedure”. *Mater Struct* **53**. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01568-8>
- [9] Miroslav Sýkora. Et al. (2018). “Assessment of compressive strength of historic masonry using non-destructive and destructive techniques”. Construction and Building Materials. Volume 193. Pages 196-210. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.180>.
- [10] Monteagudo, S. Et al. (2015) “Evaluación estructural mediante ultrasonidos del efecto del espesor de la junta de mortero en muros de fábrica de ladrillos cerámico sometidos a esfuerzos de compresión hasta su rotura”. Universidad Politécnica de Madrid. España.

- [11] Nch 167. (2001). “Construcción - Ladrillos cerámicos - Ensayos”. Norma Chilena Oficial. PA.
- [12] Nch 158. (1967). “Cementos – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento”. Norma Chilena Oficial. PA.
- [13] Proceq S.A. (2017) “Manual de operación Pundit Lab”.
- [14] British Standard. Testing concrete. Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. 1986.
- [15]. Chaudhry. H. (1987). Applied Hydraulic Transients 2 nd Ed. van Nostrand Reinhold
- [16] Harry, A. H. 1988. Masonry: Materials, Design, Construction, and Maintenance. ASTM. USA.
- [17] Tv, Srinivas & Pandurangan, Krishnamurthy. (2018). “Stress-Strain Characteristics of Chamber Clay Brick Masonry. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems”. 10. 8.
- [18] Piasta Z. and Czarneski L. ‘Analysis of material efficiency of resin concrete. IN Brittle Matrix Composite’, Elsevier Applied Science London and New York, pp.593-602 1989
- [19] Valbuena,S. Et al. (2016) “Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano”. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia. <https://doi.org/http://dx.doi.org/doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a08>.
- [20] Villegas, K., Perez, M. (2021) “Evaluación de la resistencia y densidad del ladrillo cerámico con diferentes proporciones de suelos (arcilla y arena)”. Universidad nacional de Jaén. Perú.
- [21] Corredor, k., Guzmán, A., Torres, N, (2020) “Factibilidad en la fabricación de ladrillos no estructurales, a partir del reciclaje de las colillas de cigarrillo”. Revista Ingeniería de Construcción. Vol 35.
- [22] Duarte, J., Detke, F., Reinert, H., García, D. Ares, A., Moller, O. (2017) “Aproximación del comportamiento de ladrillos cerámicos huecos mediante métodos numéricos”. Mecánica Computacional Vol XXXV, págs. 2077-2091
- [23] Álvarez, M., Larsen, R. (2014) “Estudio de la resistencia a la fatiga de la albañilería, mediante la determinación de la resistencia a cargas cíclicas de diversos tipos de probetas”. Universidad austral de Chile.
- [24] Vinuesa, P. (22 de octubre de 2016) “Regresión lineal y polinomial: teoría y práctica”. Vol 7. https://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/R4biosciences/docs/Tema9_regresion.html.
- [25] J. Krautkramer & H. Krautkramer. (1990). Ultrasonic testing of materials. (Ed. 4). Alemania: Springer.
- [26] Monteagudo, S., Casati, M. (2010) “Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos”. Universidad politécnica de Madrid, España.