

**VERIFICACIÓN DE PROPIEDADES DE BLOQUE DE PLÁSTICO RECICLADO CON AGLOMERANTE DE CEMENTO COMO ALTERNATIVA CONSTRUCTIVA DEL LADRILLO ARTESANAL PARA USO DE RELLENO EN MUROS DE ALBAÑILERÍA.**

*Carlos Quezada Chavarría <sup>1</sup>, Felipe González Monsalve <sup>2</sup>, Edwin Behrens Rincón <sup>3</sup>*

**RESUMEN:**

En la actualidad cada año se vierten en el océano una cantidad aproximada de 8 millones de toneladas de plástico, lo equivalente a un camión de basura por minuto y se estima que para el año 2050 la cantidad ascenderá a lo equivalente a 3 camiones por minuto de este desecho.

En Chile se recicla tan solo un 8,5% de la cantidad total de desechos plásticos generados a nivel país, donde del total aproximado de 990.000 toneladas que se generan, solo un 17% corresponde a desechos de origen doméstico, de los cuales se recicla un total aproximado de 83.679 toneladas anuales a las que corresponde un 55% de tipo PET, que es el desecho reciclado más abundante en el país.

Es por esta problemática por lo que se desarrolla la idea de convertir el plástico principalmente de uso doméstico que corresponde a PET en bloques fabricados a partir de una mezcla de hormigón y plástico reciclado, que se espera puedan ser utilizados como sustituto del tradicional ladrillo artesanal como relleno para muros de albañilería.

Para verificar el posible uso de este material como alternativa al ladrillo artesanal es que se desarrollarán diversos ensayos de laboratorio estipulados en la norma Chilena NCh 167, Of 2001. para cuantificar y comparar las propiedades mecánicas de esfuerzos de resistencia a compresión máxima y adherencia a cizalle, así como las propiedades de eflorescencia, absorción de agua y succión, además de la transmitancia térmica del material para verificar que el bloque de hormigón PET cumple con las condiciones básicas necesarias para ser un posible sustituto del ladrillo artesanal como relleno de muros de albañilería.

Dentro de los ensayos realizados, en el bloque de plástico reciclado se obtiene resultados superiores a los mínimos indicados en la norma mencionada anteriormente, y a su vez, también superando los valores obtenidos para el ladrillo artesanal, como por ejemplo en el caso de la compresión, donde el valor mínimo es de 4 MPa, para el ladrillo artesanal se obtiene un valor promedio de 4,32 MPa y a si mismo para el bloque de plástico reciclado un valor promedio de resistencia a compresión de 6,13 MPa superando ampliamente la resistencia mínima indicada por la norma y también la resistencia del material comparativo.

Otro ejemplo es el caso de la adherencia a cizalle, donde el valor mínimo según la norma es de 0,18 MPa, para el ladrillo artesanal es de 0,22 MPa y para el bloque de plástico reciclado alcanza un valor de 0,94 MPa.

**PALABRAS CLAVES: Reciclaje, Plástico, Compresión, Transmitancia Térmica.**

**ABSTRACT:**

Currently, approximately 8 million tons of plastic are dumped into the ocean every year, the equivalent of one garbage truck per minute, and it is estimated that by the year 2050 the amount will reach the equivalent of 3 trucks per minute of this waste.

In Chile, only 8,5% of the total amount of plastic waste generated in the country is recycled, and of the approximate total of 990.000 tons generated, only 17% corresponds to domestic waste, of which a total of approximately 83.679 tons are recycled annually, 55% of which is PET, the most abundant type of recycled waste in the country.

It is because of this problem that the idea of converting the plastic mainly of domestic use that corresponds to PET into blocks made from a mixture of concrete and recycled plastic, which it is hoped can be used as a substitute for the traditional handmade brick as a filling for masonry walls, has been developed.

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [cquezada@ing.ucsc.cl](mailto:cquezada@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [fgonzalez@ucsc.cl](mailto:fgonzalez@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Revisor, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [ebehrens@ucsc.cl](mailto:ebehrens@ucsc.cl)

In order to verify the possible use of this material as an alternative to handmade brick, several laboratory tests will be carried out as stipulated in Chilean standard NCh 167, Of 2001, to quantify and compare the mechanical properties of maximum compressive strength and shear adhesion, as well as efflorescence, water absorption and suction properties, in addition to the thermal transmittance of the material to verify that the PET concrete block meets the basic conditions necessary to be a possible substitute for handmade brick as masonry wall filler.

In the tests carried out on the recycled plastic block, the results obtained were higher than the minimum values indicated in the aforementioned standard, and also exceeded the values obtained for the handmade brick, as for example in the case of compression, where the minimum value is 4 [MPa], for the handmade brick an average value of 4,32 MPa is obtained and likewise for the recycled plastic block an average compressive strength value of 6,13 MPa is obtained, far exceeding the minimum strength indicated by the standard and also the strength of the comparative material.

Another example is the case of shear adhesion, where the minimum value according to the standard is 0,18 MPa, for handmade brick it is 0,22 MPa and for recycled plastic block it reaches a value of 0,94 MPa.

**KEY WORDS: Recycling, Plastic, Compression, Thermal Transmittance.**

## 1 INTRODUCCIÓN

La contaminación de origen antrópico en suelos y océanos se debe en gran parte a la generación de plásticos de un solo uso, de hecho, en el año 2021, *Minderoo Foundation* indicó que durante el año 2019 se alcanzaron las 130 millones de toneladas, de las cuales la mayoría termina en el océano o en vertederos legales o ilegales<sup>4</sup>, generando un aumento global en el uso desproporcionado de este producto.

Según el ranking elaborado por *Minderoo Foundation (2021)*, Chile se encuentra actualmente en el puesto 24° a nivel mundial en la generación de desechos plásticos de un solo uso, y en el 5° lugar dentro del continente, con un total de 48 kg de plástico por persona al año<sup>5</sup>. Además, según la revista publicada por el Pacto Chileno de los Plásticos (2021), al año 2019 en Chile un 17% de los desechos corresponden a origen domiciliario y 7.855 toneladas de plástico al año retribuyen a PET (Polyethylene Terephthalate).

Según Costa del Pozo (2012) respecto al PET, se tiene que de los desechos de origen domiciliario abarca un 55% de lo que se recicla. Esto permite considerarlo como un producto abundante respecto a los diversos usos que se le puede dar, ya que este tipo de desechos es de fácil manejabilidad y no dificulta el reciclaje.

Por lo tanto, se abarca el concepto de innovación en el ámbito de la construcción a través del uso de este material mediante bloques similares a los de albañilería, como una forma de mitigar los desechos de origen domiciliario respecto al plástico.

Sin embargo, Infante y Valderrama indican que el PET por sí solo no se puede considerar como un material de construcción debido a que no cumple con requisitos mínimos de diversas propiedades mecánicas y térmicas (2019), por lo que es necesario considerarlo únicamente como un material complementario o de mejora hacia otros materiales convencionales utilizados en edificaciones.

Debido a lo anterior, se decide realizar bloques con características similares al de un ladrillo artesanal utilizando el cemento como aglomerante, comparando mecánica y térmicamente el comportamiento entre ambos productos. Esta comparación se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio regidos por la norma chilena NCh 167, Of. 2001, evaluando parámetros como la resistencia máxima a compresión, adherencia a cizalle, eflorescencia, succión y absorción de agua. Respecto a la transmitancia térmica del producto final, se analiza el parámetro con el fin de verificar propiedades de uso en envolventes como material aislante.

---

<sup>4</sup> <https://www.minderoo.org/plastic-waste-makers-index/findings/executive-summary/>

<sup>5</sup> <https://www.minderoo.org/plastic-waste-makers-index/data/flows/#/sankey/americas/5>

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

- Comparar mediante ensayos normados en NCh 167, Of. 2001 el comportamiento del ladrillo artesanal y el bloque de hormigón con plástico reciclado, para evaluar el nuevo material como alternativa constructiva para muros de albañilería y adicionalmente comparar de manera experimental la transmitancia térmica y el costo asociado a la fabricación.

### 2.2 Objetivos específicos

- Fabricar bloque de hormigón con PET reciclado.
- Comparar propiedades entre bloque de plástico reciclado y ladrillo artesanal mediante ensayos de resistencia máxima a compresión, adherencia a cizalle, eflorescencia, absorción de agua y succión.
- Realizar análisis comparativo adicional experimentalmente para la transmitancia térmica y de costos entre el producto fabricado y el ladrillo artesanal.

## 3 METODOLOGÍA

### 3.1 Fabricación de probeta

El bloque de hormigón se compone en un 20% de botellas plásticas recicladas de PET, que proviene del uso doméstico de botellas de gaseosa y agua mineral, trituradas en partículas entre los 2 y 5 mm de diámetro como se muestra en la **Figura 1**, lo que facilita la homogeneización de la mezcla.

Estas partículas son mezcladas con un 80% de hormigón con árido fino, con relación cemento, árido y agua en proporción 1:4:0,6, completando así el total de la mezcla que compone la probeta que es moldeada geoméricamente similar a una unidad de ladrillo artesanal.



**Figura 1:** Partículas de PET triturado.  
Fuente: Elaboración propia.

Para mezclar estos dos materiales, se utiliza la mezcladora de accionamiento eléctrico según lo indicado en la norma chilena NCh 158, Of. 1967, de marca Controls, modelo 65-L0005 (**Figura 2**).

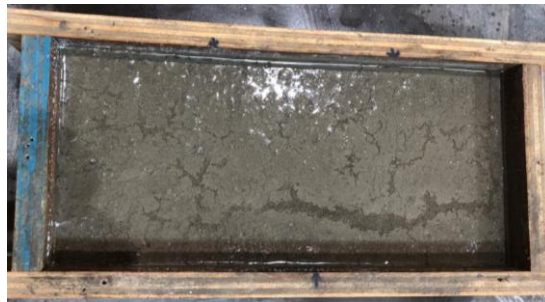
Específicamente, el procedimiento adaptado para mezclar toma en cuenta lo expuesto en el apartado 3.5.4 de la norma, donde se indican las velocidades de rotación de la paleta. Además según el apartado 6.3 de la misma, se adopta el procedimiento respecto a los tiempos de mezcla.

Finalmente, debido a que la capacidad máxima de mezclado del equipo es de 5 kg, no se debe exceder esta cantidad, por lo que cada probeta se elabora de manera individual.



**Figura 2:** Mezcladora Controls modelo 65-L0005.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Obtenida la mezcla, se deposita en los moldes cuyas dimensiones corresponden a una longitud de 28,5 cm, ancho de 14 cm y alto de 4,5 cm. El proceso de vaciado de la mezcla se realiza a través de capas, donde cada una es apisonada con el fin de reducir los cúmulos de aire que se pudiesen formar durante el vaciado. Las capas se escarifican para mejorar la adhesión del material entre ellas, proceso que se repite hasta completar el vaciado total de la mezcla y alcanzar los 4,5 cm de altura. Esto se muestra en la **Figura 3**.



**Figura 3:** Molde con mezcla recién vaciada.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Finalmente, luego de 48 horas se realiza el desmolde asegurando que al retirar la probeta se mantenga su integridad óptima, ya que si el retiro genera daños, esta se debe descartar y no se puede utilizar para ensayos de ningún tipo. En la **Figura 4** se muestra un ejemplo de lo descrito.



**Figura 4:** Probeta desmoldada después de 48 horas.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Las probetas se almacenan en un lugar limpio. Además, se deja fraguar durante 28 días antes de someterla a cualquier procedimiento, asegurando que el hormigón adquiera una resistencia mecánica adecuada antes de que la probeta sea sometida a algún ensayo de los descritos a continuación.

### 3.2 Descripción de ensayos

Los ensayos que se realizan tanto al producto fabricado como al ladrillo artesanal siguen lo estipulado en la norma chilena NCh 167, Of. 2001 – Construcción – Ladrillos cerámicos – Ensayos.

Sin embargo la norma es aplicable para ladrillos cerámicos, es decir, fabricados industrialmente, por lo que se extrapolará a los materiales analizados para realizar una comparativa del comportamiento entre ambos productos.

Respecto a la transmitancia térmica de ambos productos, se utiliza un procedimiento experimental basado en medición de temperaturas, parámetros geométricos y flujo de calor que pasa a través del material.

#### 3.2.1 Resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia máxima a la compresión de unidades de albañilería, el procedimiento se rige según lo descrito en la norma NCh 167, Of. 2001, que establece que la cantidad mínima a ensayar es de 6 ladrillos, los que deben ser refrentados con una mezcla de yeso-cemento en relación 1:1 para asegurar la planeidad y paralelismo de las caras que estarán expuestas a la carga de compresión.

Todos las unidades ya sea de ladrillos artesanales como de probetas de hormigón PET se ensayan a esfuerzo normal, teniendo como condición que la velocidad de carga en ningún momento sea mayor a los 20 MPa/min. Obteniendo lecturas con una aproximación de  $\pm 1\%$ .

Cabe destacar que debido a las dimensiones de las placas de carga del equipo, se debe ensayar solo la mitad de una probeta para obtener resultados representativos del ensayo de compresión. Esto se justifica debido a que la carga debe ser ejercida en la totalidad de sus caras y no de manera parcial.

La resistencia a la compresión está dada por la relación entre la carga máxima que resiste una unidad por la superficie media de sus caras de apoyo, siendo expresada en MPa. Esto se describe en la **Ecuación 1**.

$$R = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Donde:

**R**: Resistencia máxima a compresión, en MPa.

**P**: Carga medida, en N.

**S**: Superficie media de sus caras, en mm<sup>2</sup>.

#### 3.2.2 Absorción de agua

Para este ensayo se utiliza lo expuesto en el apartado 5 de la norma NCh 167, Of. 2001, donde se describen procedimientos como aparatos necesarios, tamaño de la muestra y ensayos.

Los resultados se basan según lo mostrado en la **Ecuación 2**, que muestra la cantidad de agua que absorbe una probeta mediante inmersión total durante 24 horas.

$$A = \left( \frac{P_2 - P_1}{P_1} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

**A**: Absorción de agua, en %.

**P<sub>1</sub>**: Masa de probeta seca, en kg.

**P<sub>2</sub>**: Masa de probeta saturada, en kg.

#### 3.2.3 Adherencia a cizalle

Para este ensayo se utiliza lo expuesto en el apartado 6 de la norma NCh 167, Of. 2001, donde se describen procedimientos como aparatos necesarios, tamaño de la muestra, preparación de las probetas, refrentado de las bases de carga y ensayos.

La adherencia a cizalle está dada por la relación entre la carga de cizalle máxima que resiste una unidad por la superficie bruta de sus caras de pega, siendo expresada en MPa y descrita a continuación en la **Ecuación 3**.

$$A = \frac{P}{S} \quad (3)$$

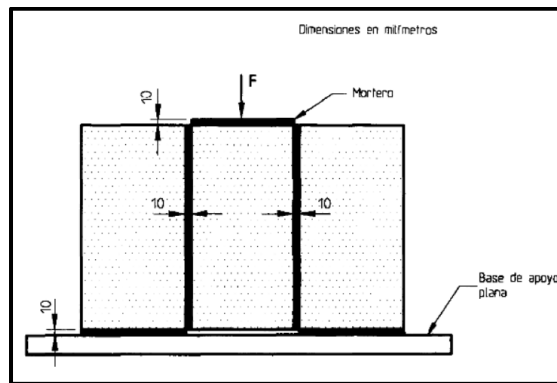
Donde:

**A:** Adherencia, en MPa.

**P:** Carga máxima, en N.

**S:** Área bruta total de las superficies de pega, en mm<sup>2</sup>.

Cada prisma se debe fabricar según la norma, que especifica lo mostrado en la **Figura 5**.



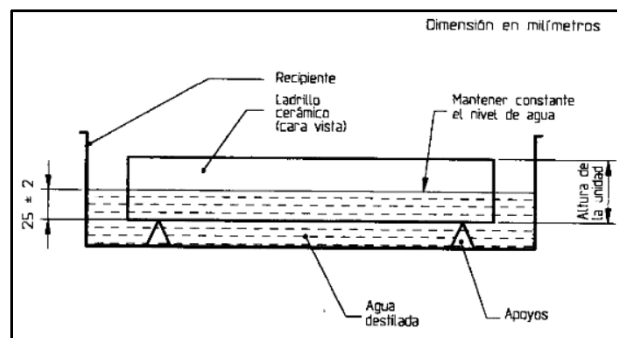
**Figura 5:** Esquema de ensayo de Adherencia a cizalle.

**Fuente:** NCh 167, Of. 2001 de Construcción – Ladrillos cerámicos - Ensayos.

### 3.2.4 Determinación de eflorescencia

Para este ensayo se utiliza lo expuesto en el apartado 7 de la norma NCh 167, Of. 2001, donde se describen procedimientos como aparatos necesarios, tamaño de la muestra y ensayos.

Se indica que la muestra mínima a ensayar es de 7 unidades, de las cuales una permanece en condiciones naturales como unidad patrón, mientras que las 6 restantes se ensayan durante 7 días, donde se deben semi sumergir con la condición de mantener constante el nivel de agua destilada en las unidades ensayadas, con una separación no inferior a 50 mm entre cada una de sus caras con respecto a otra unidad de ensayo, en un recipiente limpio con agua destilada y con apoyos como se muestra en la **Figura 6**.



**Figura 6:** Esquema de ensayo de eflorescencia.

**Fuente:** NCh 167, Of. 2001 de Construcción – Ladrillos cerámicos - Ensayos.

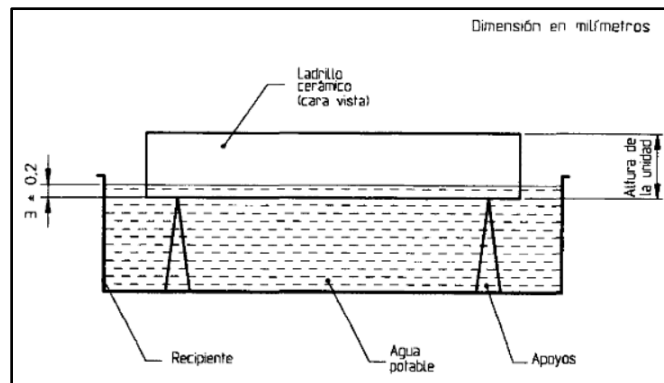
Posterior a los siete días de ensayo, todas las unidades incluyendo la unidad patrón se introducen durante 24 horas en un horno de desecación a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C. Luego se observan las caras que no se sumergieron en agua destilada, presentando o no eflorescencia respecto a la unidad patrón de cada tipo ensayado.

En caso de no observar diferencia de la unidad ensayada con la unidad patrón, el valor es 0. Si la eflorescencia es leve, el valor es 1, mientras que si la diferencia es claramente visible, el valor es 2.

### 3.2.5 Determinación de la succión

La succión es la capacidad de imbibición de agua, mediante inmersión parcial de las unidades de ladrillo artesanal o probetas de hormigón con plástico reciclado, durante un tiempo determinado.

Las unidades mínimas para ensayar según la norma son de 6 unidades de cada tipo, que se secan en estufa de desecación hasta peso constante, registrando las dimensiones de la cara en contacto con el agua y luego de transcurrido un tiempo determinado para el ensayo se retiran las unidades y se seca el excedente de agua. Posteriormente se registra el peso de cada unidad semi saturada, procurando mantener el nivel de agua constante durante todo el ensayo, como se muestra en la **Figura 7**.



**Figura 7:** Esquema de ensayo de succión.

**Fuente:** NCh 167, Of. 2001 de Construcción – Ladrillos cerámicos - Ensayos.

Determinando de esta manera los parámetros necesarios que se relacionan mediante la **ecuación 4**.

$$S = \frac{P_2 - P_1}{A_1} \quad (4)$$

Donde:

$S$ : Succión, expresada en  $\text{g/cm}^2 \times \text{min}$ , con precisión de  $0.01 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$ .

$P_1$ : Peso de la unidad antes de la inmersión parcial, en g.

$P_2$ : Peso de la unidad después de la inmersión parcial, en g.

$A_1$ : Área de la cara de apoyo de la unidad, en  $\text{cm}^2$ .

### 3.2.6 Determinación de la transmitancia térmica

La transmitancia térmica es la cantidad de energía que fluye a través de un material desde una fuente caliente hacia una fuente fría, para lo que se procede a fabricar una caja térmica aislada del exterior que permite medir la temperatura de la cara caliente y la cara fría en el mismo instante durante un tiempo determinado, con el fin de cuantificar la cantidad de energía que fluye de una fuente a otra, utilizando como medio la unidad ensayada.

Utilizando la ley de Fourier, se desprende el valor de la transmitancia térmica en función de sus propiedades geométricas y de la diferencia de temperatura en Kelvin de las caras expuestas tanto a la fuente caliente como a la fuente fría, según lo indicado en la **Ecuación 5**.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (5)$$

Donde:

$\dot{Q}$ : Flujo de calor, en W.

$\lambda$ : Conductividad térmica, en  $\text{W/m} \cdot \text{K}$ .

$A$ : Área de contacto, en  $\text{m}^2$ .

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura entre ambas Fuentes, en K.

$\Delta X$ : Espesor de la unidad ensayada, en m.

Desde esta ecuación se desprende la transmitancia térmica relacionando los parámetros medidos y obteniendo el resultado en  $\text{W/m} \cdot \text{K}$

### 3.2.7 Análisis de costo

Se analiza el costo asociado a la fabricación de una probeta de hormigón con PET reciclado en proporción 80% de hormigón y 20% de PET, mediante análisis de precio unitario y comparándolo con el valor comercial del ladrillo artesanal.

Cabe destacar que los valores asociados a los materiales de fabricación de la probeta de hormigón con PET se consideran de costo \$0 en los materiales que tienen una mínima incidencia en la fabricación del material. En este caso, el costo del agua es mínimo y el PET, al ser reciclado, no tiene costo asociado a un valor de mercado.

Estas consideraciones solo se utilizan para cuantificar el valor de elaboración para una probeta, ya que de analizar el precio en cantidades masivas, los materiales que tienen costo \$0 poseen mayor incidencia en el valor final del material. A mayor volumen de fabricación, mayor es el costo, caso que no se cumple al utilizar PET ya que es un material reciclado.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Fabricación de bloque de hormigón con PET

Según lo realizado en el laboratorio, utilizando el PET con aglomerante de cemento se fabrican probetas de dimensiones geométricas similares a las de un ladrillo artesanal, esto con la finalidad de que el producto facilite los ensayos de laboratorio. En la **Figura 8** se muestra el bloque resultante.



**Figura 8:** Probeta de hormigón PET (80%/20%).  
**Fuente:** Elaboración propia.

Se aprecia que las caras vistas principales a excepción de la cara superior son lisas, con porosidad notoriamente homogénea y la probeta adquiere un color grisáceo similar a una probeta fabricada solo de hormigón, mientras que la cara superior al enrasarse queda con mayor porosidad que el resto de las caras.

En cuanto al peso entre el bloque fabricado y el ladrillo artesanal, se tiene similitud entre estos, ya que el uso de áridos en los bloques de hormigón con PET se aumenta el peso, que disminuye mientras mayor sea la cantidad de PET añadida a la mezcla.

### 4.2 Resistencia máxima a compresión

Para la resistencia máxima de compresión se analizan los resultados obtenidos individualmente para cada unidad ensayada, tanto para las unidades de ladrillo artesanal como para las unidades de hormigón con plástico reciclado, además de su valor promedio.

Para una correcta comparación entre ambos materiales se aplica el mismo ensayo bajo las mismas condiciones descritas en la norma.

Para este ensayo en particular, para las unidades de hormigón PET se analizaron dos dosificaciones, una corresponde a una mezcla de 80% de hormigón con un 20% de PET y la otra se compone por un 60% de hormigón y un 40% de PET.

Cabe destacar que en ambos casos de dosificaciones, el reemplazo de hormigón por PET es en base al volumen de la probeta, de geometría similar a la del ladrillo artesanal promedio.

Las unidades fabricadas son rotuladas con un código específico para cada producto, el que servirá para identificar el tipo de material, porcentaje de la mezcla entre hormigón y PET, además del número de unidad a ensayar.

De esta manera se le asigna el código **PH100-00.XX**, a las probetas fabricadas en un 100% de hormigón, **PH80-20.XX** a las probetas compuestas en un 80% de hormigón y un 20% de PET, **PH60-40.XX**, a las probetas compuestas de un 60% de hormigón y 40% PET y finalmente el código **Lad.Fiscal.XX** a las unidades correspondientes a ladrillos artesanales, siendo **XX** reemplazado por el número asignado a cada unidad.

#### 4.2.1 Ensayo de resistencia máxima a compresión para probetas de hormigón sin PET.

**Tabla 1:** Resultados de ensayo de resistencia máxima a compresión para probetas de solo hormigón.

Compresión probeta Hormigón			Descripción de la probeta				Resistencia compresión [MPa]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistencia media [MPa]
Código	Carga [t]	Presión [kg/cm <sup>2</sup> ]	Peso [g]	b [mm]	h [mm]	w [mm]			
PH100-00.01	31,24	158,26	2386	141	58	140	15,53	2083,99	13,84
PH100-00.02	28,65	146,17	2186	140	56	140	14,34	1991,62	
PH100-00.03	30,65	156,36	2136	140	54	140	15,34	2018,14	
PH100-00.04	23,90	120,21	2064	142	57	140	11,79	1821,46	
PH100-00.05	27,12	137,39	2265	141	58	140	13,48	1978,30	
PH100-00.06	25,46	128,07	2108	142	56	140	12,56	1893,50	

Para comprobar que la dosificación planteada de cemento, árido y agua en relación 1:4:0,6 es similar a la de un hormigón H15, que presenta una resistencia a la compresión de 150 kg/cm<sup>2</sup> o lo equivalente a 14,72 MPa, se realiza el ensayo a probetas de dimensiones geométricas idénticas a las demás probetas fabricadas, a modo de simular las mismas condiciones y parámetros de carga, según lo indicado en la norma NCh 170, Of. 1985.

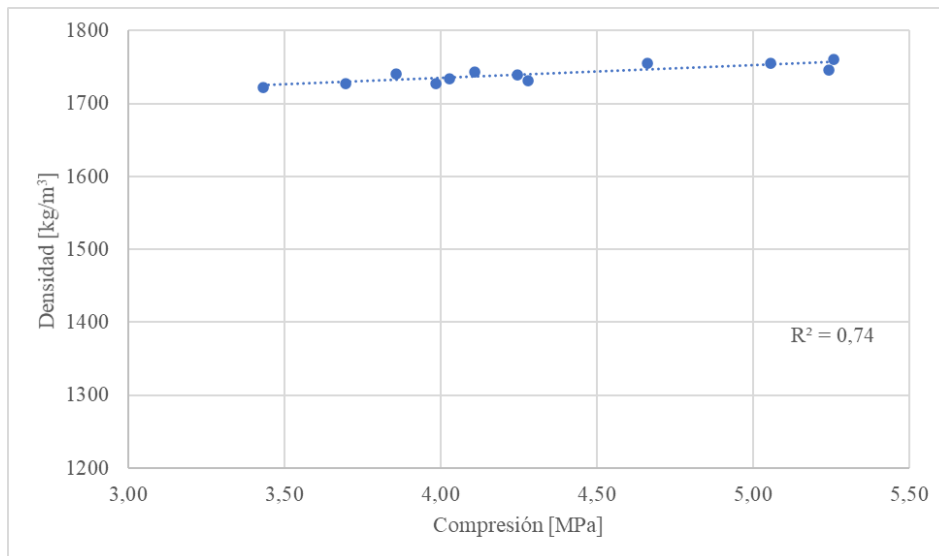
En este caso, la resistencia media es de 13,84 MPa, que es un valor cercano al indicado en la norma nombrada anteriormente.

#### 4.2.2 Ensayo de resistencia máxima a compresión para ladrillo artesanal

**Tabla 2:** Resultados de ensayo de resistencia máxima a compresión para unidades de ladrillo artesanal.

Compresión Ladrillo fiscal			Descripción de la probeta				Resistencia compresión [MPa]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistencia media [MPa]
Código	Carga [t]	Presión [kg/cm <sup>2</sup> ]	Peso [g]	b [mm]	h [mm]	w [mm]			
LadFiscal.38	8,83	41,89	1912	148	52	142,5	4,11	1743,44	4,32
LadFiscal.39	7,94	37,65	1895	148	52	142,5	3,69	1727,94	
LadFiscal.40	8,63	41,05	2042	144	56	146,0	4,03	1734,41	
LadFiscal.41	8,94	43,27	2012	145	56	142,5	4,24	1738,83	
LadFiscal.42	9,92	47,51	2015	144	55	145,0	4,66	1754,62	
LadFiscal.43	11,08	53,44	2028	145	56	143,0	5,24	1746,53	
LadFiscal.44	10,98	51,51	2095	145	56	147,0	5,05	1755,14	
LadFiscal.45	8,36	40,60	1992	145	56	142,0	3,98	1727,61	
LadFiscal.46	8,21	39,31	2036	145	56	144,0	3,86	1741,24	
LadFiscal.47	9,04	43,60	2011	145	56	143,0	4,28	1731,89	
LadFiscal.48	7,30	34,96	2013	143	56	146,0	3,43	1721,74	
LadFiscal.49	11,42	53,58	2102	145	56	147,0	5,26	1761,00	

De esta manera se obtiene que para el ladrillo artesanal su resistencia máxima a compresión media es de 4,32 MPa con valores oscilando entre los 3,96 MPa y 5,24 MPa, resultando en un valor medio de la muestra mayor al valor mínimo que debe resistir de acuerdo con la norma NCh 2123, Of. 1997, Anexo B, con valor de 4 MPa.



**Figura 9:** Resistencia máxima a compresión para probetas de ladrillo artesanal.

**Fuente:** Elaboración propia.

Desde la **Figura 9** se desprende que la relación entre la densidad y la resistencia máxima a compresión indica que mientras más densa es la unidad estudiada, más resistencia a compresión soporta la probeta antes de fallar.

La correlación de los datos dado el valor de  $R^2=0,74$  indica una buena relación entre los valores de estudio, ya que el modelo lineal se ajusta a los resultados obtenidos.

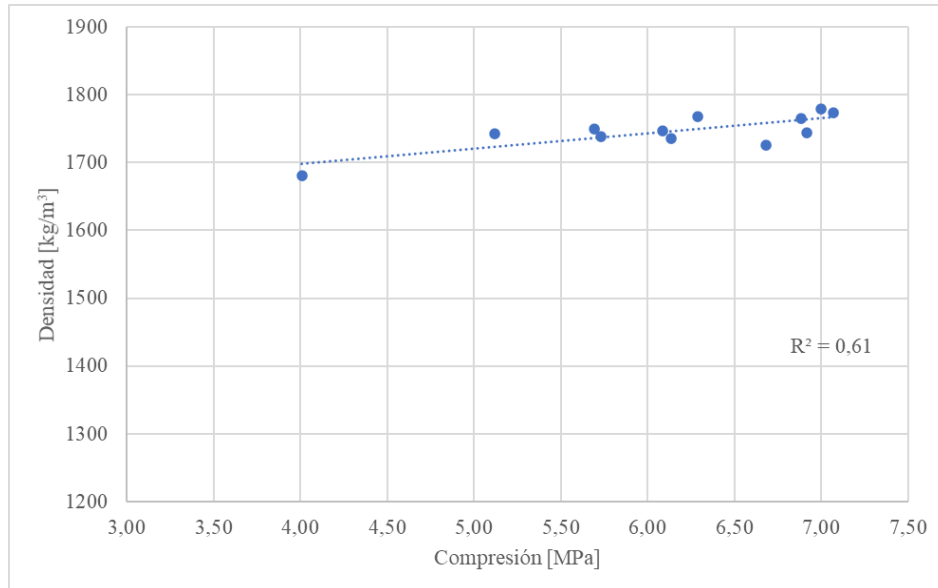
4.2.3 Ensayo de resistencia máxima a compresión para probeta de hormigón PET en proporción 80% hormigón y 20% PET.

**Tabla 3:** Resultados de ensayo de resistencia máxima a compresión para probetas de hormigón PET con proporción de 80% hormigón y 20% PET reciclado.

Compresión probeta PET-Hormigón			Descripción de la probeta				Resistencia compresión [MPa]	Densidad [kg/m³]	Resistencia media [MPa]
Código	Carga [t]	Presión [kg/cm²]	Peso [g]	b [mm]	h [mm]	w [mm]			
PPH80-20.38	13,75	70,15	1938	140	56	140	6,88	1765,67	6,13
PPH80-20.39	12,16	62,06	1918	140	56	140	6,09	1747,45	
PPH80-20.40	12,56	64,08	1906	139	55	141	6,29	1768,18	
PPH80-20.41	12,26	62,55	1871	140	55	140	6,14	1735,62	
PPH80-20.42	11,28	58,39	1848	138	55	140	5,73	1739,13	
PPH80-20.43	11,37	58,02	1852	140	54	140	5,69	1749,81	
PPH80-20.44	13,35	68,10	1895	140	56	140	6,68	1726,49	
PPH80-20.45	13,98	71,33	1953	140	56	140	7,00	1779,34	
PPH80-20.46	13,82	70,01	1915	140	56	140	6,92	1744,72	
PPH80-20.47	14,02	72,05	1968	140	57	139	7,07	1774,22	
PPH80-20.48	8,01	40,87	1812	140	55	140	4,01	1680,89	
PPH80-20.49	10,23	52,19	1878	140	55	140	5,12	1742,12	

Considerando que las densidades son similares, tanto para el caso de las unidades de ladrillo artesanal como para las unidades de hormigón PET en proporción de 80% de hormigón y 20% de PET, se desprende que a pesar de tener similitud en las densidades, los valores de soporte de carga máxima son mayores. Esto se debe a que al mezclar hormigón de tipo similar a H15 con las partículas de PET, y si bien el bloque tiene menor peso que un bloque 100% de hormigón, el peso se reduce debido a la cantidad de partículas de PET presentes en la mezcla, resultando así en un material de densidad similar pero con mejor soporte máximo de carga el ladrillo artesanal.

El valor medio de la resistencia de las probetas de hormigón PET (80%/20%) es de 6,13 MPa superando en un 41,90% la resistencia media obtenida en las unidades de ladrillo artesanal.



**Figura 10:** Resistencia máxima a compresión para probetas de hormigón PET en proporción 80% de hormigón y 20% de PET reciclado.

**Fuente:** Elaboración propia.

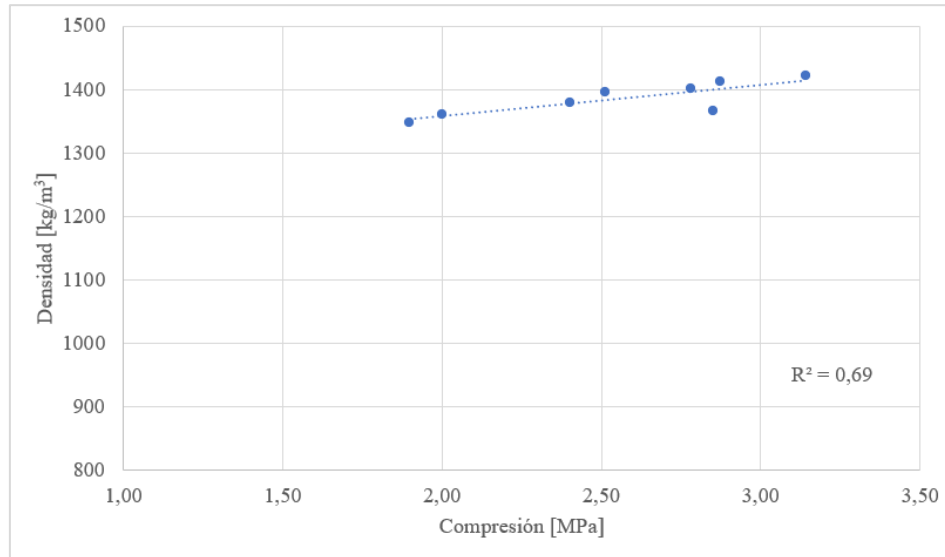
La correlación de los datos que se desprende de la **Figura 10** indica que, al igual que su símil de ladrillo artesanal, a mayor densidad, mayor es la resistencia máxima a compresión. En este caso, el valor de  $R^2=0,61$  indica que la correlación de datos del modelo lineal es aceptable.

4.2.4 Ensayo de resistencia máxima a compresión para probeta de hormigón PET en proporción 60% hormigón y 40% PET.

**Tabla 4:** Resultados de ensayo de resistencia máxima a compresión para probetas de hormigón PET con proporción de 60% de hormigón y 40% de PET reciclado.

Compresión probeta PET-Hormigón			Descripción de la probeta				Resistencia compresión [MPa]	Densidad [kg/m³]	Resistencia media [MPa]
Código	Carga [t]	Presión [kg/cm²]	Peso [g]	b [mm]	h [mm]	w [mm]			
PPH60-40.01	4,87	24,50	1590	142	58	140	2,40	1378,96	2,56
PPH60-40.02	4,00	20,43	1546	140	58	140	2,00	1359,96	
PPH60-40.03	6,32	30,20	1572	141	56	140	3,14	1422,06	
PPH60-40.04	5,56	28,37	1592	140	58	140	2,78	1400,42	
PPH60-40.05	5,78	29,07	1576	142	58	140	2,85	1366,82	
PPH60-40.06	5,09	25,60	1553	142	56	140	2,51	1394,98	
PPH60-40.07	5,78	28,87	1561	141	56	140	2,87	1412,11	
PPH60-40.08	3,79	19,36	1533	140	58	140	1,90	1348,52	

En el caso de las probetas fabricadas a partir de la dosificación de 60% hormigón y 40% PET, se obtienen menores densidades debido a la cantidad de PET presente en la mezcla, lo que disminuye su peso pero a su vez la capacidad máxima de soporte a compresión, de manera que el valor medio de resistencia máxima a compresión para probetas con proporción 60% de hormigón y 40% PET es de 2.56 MPa, que equivale a un 40.74% menos que el valor medio de resistencia máxima a compresión que presentan las unidades de ladrillo artesanal.



**Figura 11:** Resistencia máxima a compresión para probetas de hormigón PET en proporción de 60% de hormigón y 40% de PET reciclado.

**Fuente:** Elaboración propia.

De la **Figura 11** se obtiene un valor de  $R^2=0,69$ , indica una correlación entre los datos aceptable. Además, los ladrillos artesanales a mayor densidad mayor capacidad de soporte, por lo que se infiere que la relación entre la densidad y la resistencia máxima a compresión es directa.

Comparando los valores medios de cada uno de los tipos de probetas ensayadas bajo la norma NCh 167, Of. 2001, se destaca que la densidad y la resistencia máxima a compresión son directamente proporcionales, también se destaca que la resistencia disminuye considerablemente al agregar un mayor porcentaje de PET a la mezcla.

Si bien con 20% basta para superar la resistencia máxima a compresión de los ladrillos artesanales, cabe destacar que la mezcla se puede optimizar aún más para obtener un producto más liviano y con la misma capacidad de soporte que un ladrillo, así mismo se puede identificar que al agregar PET al hormigón, baja considerablemente la resistencia inicial que se adquiere solo con el hormigón.

Finalmente, se obtiene como resultado de la comparación entre el ladrillo artesanal y la dosificación de 80% de hormigón y 20% PET, que se mejora la capacidad de resistencia máxima a compresión. Caso contrario sucede con la dosificación de 60% hormigón y 40% PET, que presenta una resistencia máxima a compresión menor que el ladrillo artesanal, y por ende, también a la primera dosificación (80%/20%).

### 4.3 Absorción de agua

El ensayo se realiza para ladrillo artesanal y para la dosificación de 80% hormigón y 20% PET.

A continuación, se presentan los resultados de forma individual para cada unidad ensayada, y el valor promedio correspondiente.

#### 4.3.1 Ensayo de absorción de agua para ladrillo artesanal.

**Tabla 5:** Resultado para ensayo de absorción para ladrillo artesanal.

Ensayo de absorción en ladrillo artesanal				
Código	P1 [kg]	P2 [kg]	A [%]	A media [%]
LadFiscal.25	3,416	4,156	21,66	21,82
LadFiscal.26	3,423	4,213	23,08	
LadFiscal.27	3,431	4,158	21,19	
LadFiscal.28	3,456	4,182	21,01	
LadFiscal.29	3,327	4,098	23,17	
LadFiscal.30	3,487	4,212	20,79	

De la tabla anterior se obtiene que el ladrillo artesanal es capaz de absorber un 21,82% de su peso al estar totalmente saturado, generando que en un muro construido a base de este material aumente su peso propio considerablemente en condiciones totalmente saturadas, encontrándose dentro del valor máximo que corresponde a 22% de su peso de acuerdo con la norma NCh 2123, Of. 1997.

4.3.2 Ensayo de absorción de agua para probeta de hormigón PET en proporción 80% de hormigón y 20% de PET.

**Tabla 6:** Resultados para ensayo de absorción para probeta de hormigón PET 80%/20%

Ensayo de absorción en probetas PET-Hormigón				
Código	P1 [kg]	P2 [kg]	A [%]	Absorción media [%]
PPH80-20.25	3,383	3,577	5,73	4,80
PPH80-20.26	3,392	3,566	5,13	
PPH80-20.27	3,462	3,601	4,02	
PPH80-20.28	3,457	3,626	4,89	
PPH80-20.29	3,360	3,533	5,15	
PPH80-20.30	3,289	3,417	3,89	

De la tabla anterior se obtiene que para este tipo de probetas la absorción de peso es de tan solo un 4,8%, muy por debajo del porcentaje de absorción de peso de las unidades de ladrillo artesanal ensayadas.

#### 4.4 Ensayo de adherencia a cizalle.

A continuación se presentan tanto los valores individuales como el valor promedio de todos los prismas ensayados para cada tipo de elemento, ya sea ladrillo artesanal o probetas de hormigón con PET (80%/20%).

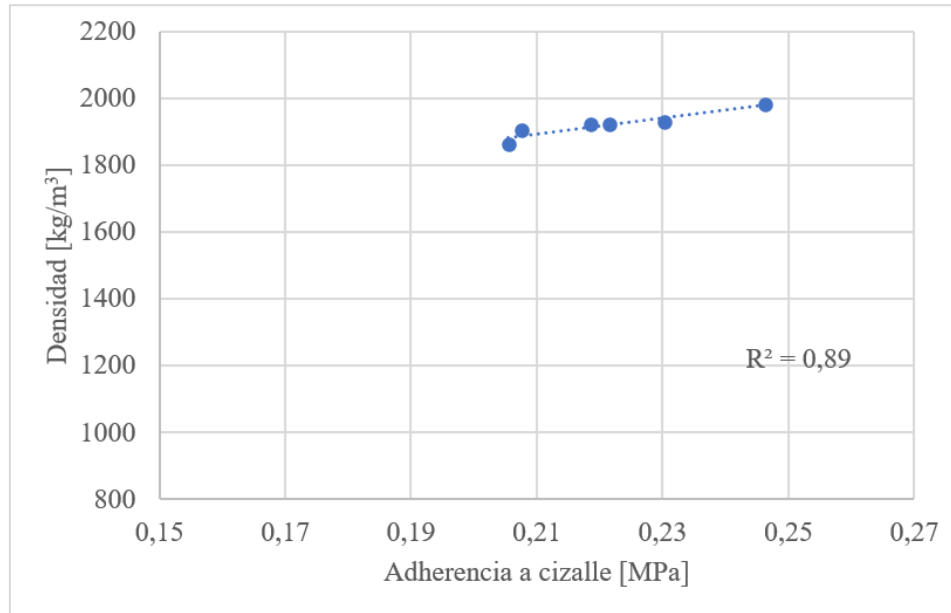
Para las probetas ensayadas, la falla ocurre de manera rápida y sorpresiva, donde no se registra rotura de las probetas sino que la falla se propaga entre el mortero y la cara de pega.

4.4.1 Ensayo de adherencia a cizalle para ladrillo artesanal

**Tabla 7:** Resultados para ensayo de adherencia a cizalle para ladrillo artesanal

Adherencia a cizalle Ladrillo artesanal			Descripción de la probeta				Resistencia compresión [MPa]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistencia media [MPa]
Código	Carga [t]	Presión [kg/cm <sup>2</sup> ]	Peso [g]	b [mm]	h [mm]	w [mm]			
LadFiscal.50	0,95	2,26	12855	145	159	290	0,222	1922,69	0,22
LadFiscal.51	0,89	2,12	13134	145	164	290	0,208	1904,53	
LadFiscal.52	0,95	2,23	13264	145	162	294	0,219	1920,63	
LadFiscal.53	1,07	2,51	13939	146	165	292	0,246	1981,58	
LadFiscal.54	0,98	2,34	12899	144	160	290	0,230	1930,53	
LadFiscal.55	0,89	2,10	13700	146	173	291	0,206	1863,93	

El valor de adherencia a cizalle mínimo aceptado por la norma NCh 2123, Of 1997, Anexo B, es de 0,18 MPa, valor que es superado en todos los prismas ensayados, resultando que el ensayo de adherencia a cizalle cumple con la norma respecto al valor promedio de 0,22 MPa e individuales.



**Figura 12:** Adherencia a cizalle para ladrillo artesanal.  
**Fuente:** Elaboración propia.

La **Figura 12** determina que la correlación de los datos es muy buena, ya que presenta un valor de  $R^2=0,89$ , mostrando un ajuste lineal alto entre la densidad del prisma y la resistencia que presenta el cizalle en las unidades de ladrillo artesanal analizadas.

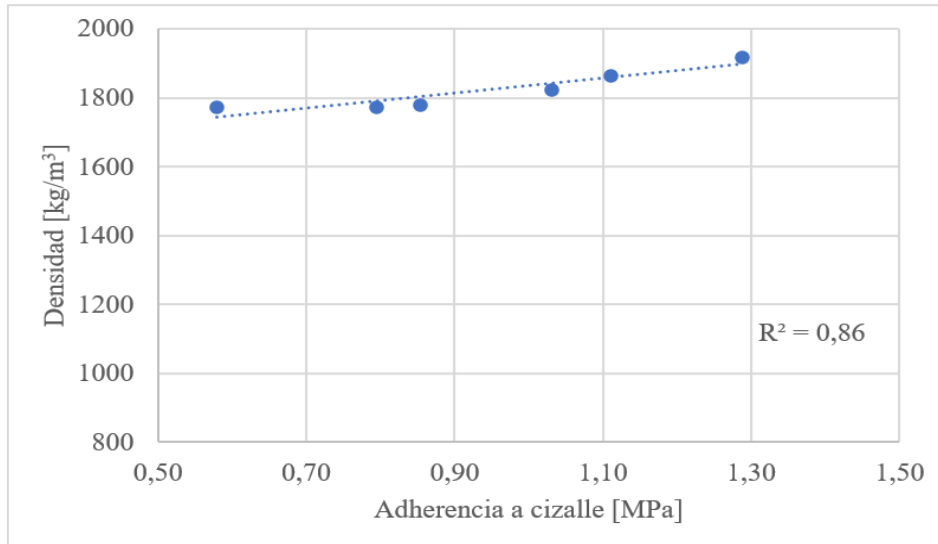
También, se desprende que la relación entre la densidad del prisma y la adherencia a cizalle es directamente proporcional, ya que a mayor densidad del prisma mayor adherencia a cizalle.

#### 4.4.2 Ensayo de adherencia a cizalle para probeta de hormigón PET en proporción 80% de hormigón y 20% de PET.

**Tabla 8:** Resultados para ensayo de adherencia a cizalle para probeta de hormigón PET (80%/20%).

Adherencia a cizalle probeta Hormigón PET			Descripción de la probeta				Resistencia compresión [MPa]	Densidad [kg/m³]	Resistencia media [MPa]
Código	Carga [t]	Presión [kg/cm²]	Peso [g]	b [mm]	h [mm]	w [mm]			
PPH80-20.50	5,27	13,12	13637	140	177	287	1,287	1917,50	0,94
PPH80-20.51	3,51	8,71	13285	140	185	288	0,854	1781,02	
PPH80-20.52	4,53	11,31	13825	140	185	286	1,110	1866,38	
PPH80-20.53	2,38	5,90	13227	140	185	288	0,579	1773,25	
PPH80-20.54	3,24	8,09	12998	140	183	286	0,794	1773,91	
PPH80-20.55	4,22	10,50	13714	140	187	287	1,030	1825,21	

El valor medio de la adherencia a cizalle para las probetas de hormigón PET es de 0,94 MPa, superando la capacidad de soporte de su símil de ladrillo artesanal. Esto indica una mejor adherencia entre el mortero de pega y las probetas de hormigón PET, resultando en un elemento, que en conjunto, es capaz de resistir mayor carga de cizalle que los prismas de ladrillo artesanal, así mismo se supera el valor mínimo exigido por la normativa vigente.



**Figura 13:** Adherencia a cizalle de probeta de hormigón PET (80%/20%).

**Fuente:** Elaboración propia.

En la **Figura 13** se observa que las variables son directamente proporcionales, es decir, que a mayor densidad, mayor será la resistencia a cizalle del prisma. Además, el valor de  $R^2=0,86$  indica alto ajuste del modelo lineal que describe la relación entre la densidad y el cizalle que soportan los prismas ensayados.

#### 4.5 Determinación de eflorescencia

En este apartado se muestran los rangos de valores resultantes al analizar la eflorescencia de las probetas.

**Tabla 9:** Rango de valores de la sumatoria de las unidades ensayadas para la determinación de la eflorescencia.

Rango	Estado
0 a 5	No eflorescido
6 a 8	Ligeramente eflorescido
9 a 12	Eflorescido

A continuación se presenta las tablas resumen para cada tipo de muestra analizada para la determinación de la eflorescencia.

**Tabla 10:** Resultados determinación de eflorescencia en ladrillos artesanal

Eflorescencia ladrillos artesanal		
código	Valor	Estado
LadFiscal.31	0	No eflorescido
LadFiscal.32	0	No eflorescido
LadFiscal.33	1	Ligeramente Eflorescido
LadFiscal.34	2	Eflorescido
LadFiscal.35	1	Ligeramente Eflorescido
LadFiscal.36	2	Eflorescido
<b>Sumatoria</b>	<b>6</b>	<b>Ligeramente Eflorescido</b>

**Tabla 11:** Resultados determinación de eflorescencia en probetas hormigón PET en proporción 80% de hormigón y 20% de PET.

Eflorescencia probetas Hormigón PET		
código	Valor	Estado
PPH80-20.31	0	No eflorescido
PPH80-20.32	1	Ligeramente Eflorescido
PPH80-20.33	1	Ligeramente Eflorescido
PPH80-20.34	0	No eflorescido
PPH80-20.35	0	No eflorescido
PPH80-20.36	1	Ligeramente Eflorescido
<b>Sumatoria</b>	<b>3</b>	<b>No Eflorescido</b>

Una vez se tienen los valores individuales de cada unidad ensayada, se obtiene que las de ladrillo artesanal son ligeramente eflorescidas, mientras que las unidades de las probetas de hormigón con PET no presentan eflorescimiento aparente.

Esto indica que las unidades de ladrillo artesanal son más propensas a sufrir eflorescencia en muros con presencia de humedad constante, provocando que los muros comiencen a cristalizar las sales solubles y de la misma manera destruyendo un posible revestimiento.

#### 4.6 Determinación de la succión

Para la determinación de la succión se presentan tanto los valores individuales como el valor promedio de la succión en  $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$ , que representa la capacidad de imbibición de agua durante un minuto en la superficie de contacto entre la unidad ensayada y el agua.

**Tabla 12:** Resultados de ensayo de succión en unidades de ladrillo artesanal.

Ensayo de succión en ladrillo fiscal				
Código	P <sub>1</sub> [g]	P <sub>2</sub> [g]	A <sub>1</sub> [cm <sup>2</sup> ]	S [g/cm <sup>2</sup> · min]
LadFiscal.19	3414	3481	416,15	0,1610
LadFiscal.20	3422	3497	417,60	0,1796
LadFiscal.21	3429	3493	419,04	0,1527
LadFiscal.22	3452	3513	414,72	0,1471
LadFiscal.23	3324	3389	411,84	0,1578
LadFiscal.24	3485	3559	413,28	0,1791
<b>Succión promedio</b>				<b>0,1629</b>

De la misma manera, se presentan los resultados obtenidos para las unidades de probetas de hormigón PET ensayadas, los que se muestran a continuación en la **Tabla 13**.

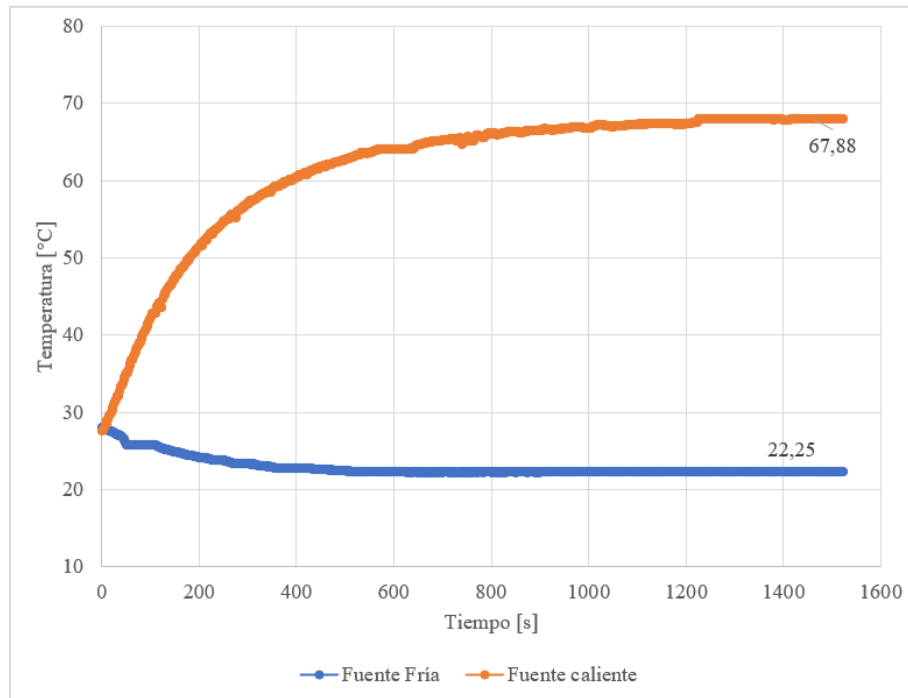
**Tabla 13:** Resultados de ensayo de succión en unidades de hormigón PET con proporción 80% de hormigón y 20% de PET.

Ensayo de Succión en probetas PET-Hormigón				
Código	P <sub>1</sub> [g]	P <sub>2</sub> [g]	A <sub>1</sub> [cm <sup>2</sup> ]	S [g/cm <sup>2</sup> · min]
PPH80-20.19	3457	3463	399	0,0150
PPH80-20.20	3456	3464	399	0,0201
PPH80-20.21	3390	3397	399	0,0175
PPH80-20.22	3379	3388	399	0,0226
PPH80-20.23	3367	3369	399	0,0050
PPH80-20.24	3291	3294	399	0,0075
<b>Succión promedio</b>				<b>0,0146</b>

Se obtiene como resultado que la succión durante el mismo tiempo es mayor en las unidades de ladrillo artesanal, lo que implica que al momento de confeccionar un muro con este material, puede absorber el agua presente en el mortero de pega provocando que el mortero no tenga un fragüe adecuado, lo que puede generar resistencia deficiente a cizalle en el muro.

#### 4.7 Determinación de la transmitancia térmica

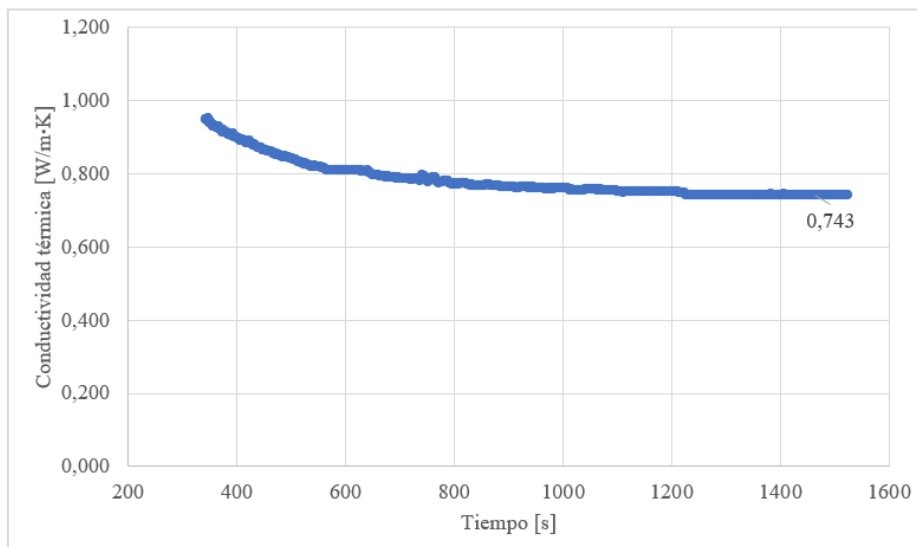
Para determinar la transmitancia térmica, se analiza el registro de la variación de temperatura en función del tiempo durante aproximadamente 20 min, donde se aprecia que las curvas asociadas tanto a la fuente fría como a la fuente caliente tienden a mantenerse constantes en el tramo final. Esto se analiza tanto para las probetas de hormigón PET como para el ladrillo artesanal.



**Figura 14:** Registro de variación de temperatura en función del tiempo para el ladrillo artesanal.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la **Figura 14** se observa que la temperatura de la fuente caliente tiende a ser constante alrededor de los 67,88 °C, y para la fuente fría en los 22,25 °C. Esto indica que el sistema se ha equilibrado térmicamente utilizando como medio de transmisión de calor la unidad ensayada.



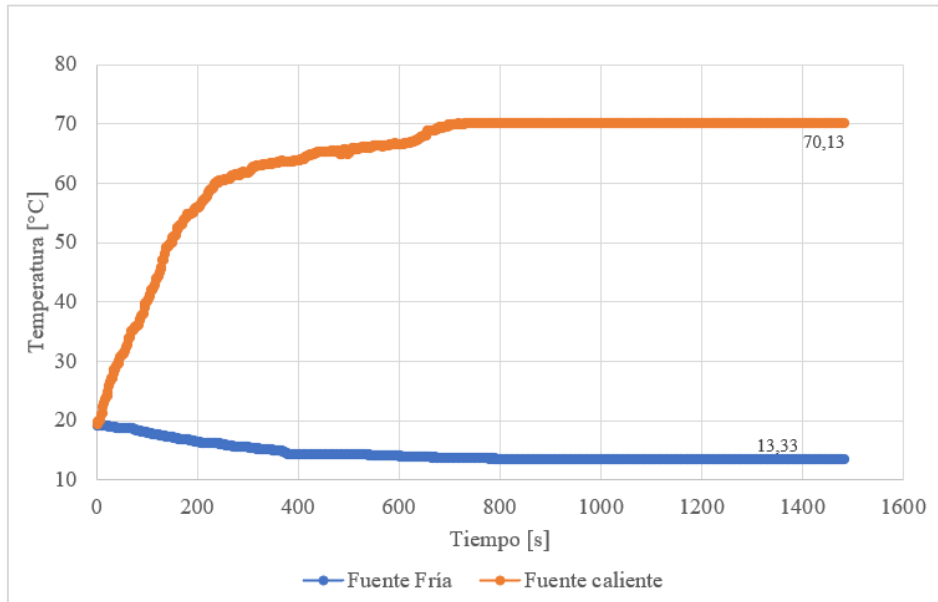
**Figura 15:** Conductividad térmica de ladrillo artesanal.

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez se obtienen todos los parámetros necesarios para utilizar la ecuación de la Ley de Fourier, se extrae la variable analizada, que entrega el valor de la transmitancia térmica presentada en W/m·K como se muestra

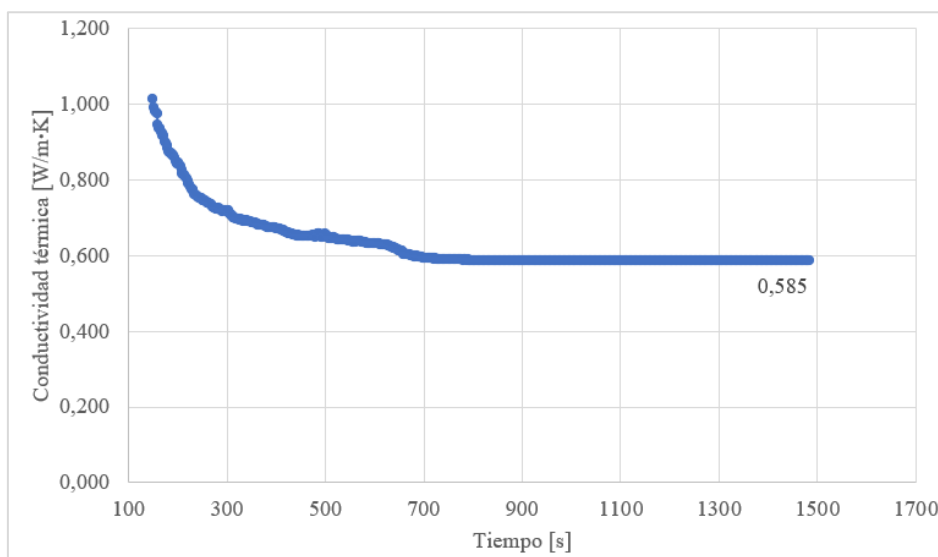
en la **Figura 15**, obteniendo así un valor de  $0,743 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Si bien para este material, de acuerdo con la norma NCh 853, Of. 2007, el valor de la transmitancia térmica para ladrillos artesanales debería corresponder a  $0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , al obtener en este parámetro de manera experimental, el valor resultante se considera aceptable para comparar la transmitancia térmica entre probetas ensayadas bajo las mismas condiciones.

De la misma manera, se analiza el registro de la variación de temperatura respecto al tiempo para la probeta de hormigón PET, representado en la **Figura 16**.



**Figura 16:** Registro de variación de temperatura en función del tiempo para la probeta de hormigón PET.  
**Fuente:** Elaboración propia.

En este caso, el equilibrio del sistema se alcanza cuando la temperatura de la fuente caliente ronda los  $70,13 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura de la fuente fría se encuentra en los  $13,33 \text{ }^\circ\text{C}$ , momento donde hay flujo continuo y constante de calor de una fuente a otra utilizando como medio la unidad ensayada.



**Figura 17:** Conductividad térmica de probeta de hormigón PET.  
**Fuente:** Elaboración propia.

De la misma manera que con el material anterior, como se muestra en la **Figura 17**, se extrae desde la Ley de Fourier el valor de la transmitancia térmica, que bajo las mismas condiciones de estudio que el ladrillo artesanal, el valor resulta ser de  $0,585 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Esto indica que la propiedad de conductividad térmica para la probeta de hormigón PET es más aislante que la de un ladrillo artesanal.

#### 4.8 Análisis de costo

El costo asociado a una unidad de ladrillo artesanal corresponde según los precios del mercado local a un valor neto de \$284.

**Tabla 14:** Análisis de precio unitario para la partida de fabricación de probetas de hormigón con PET.

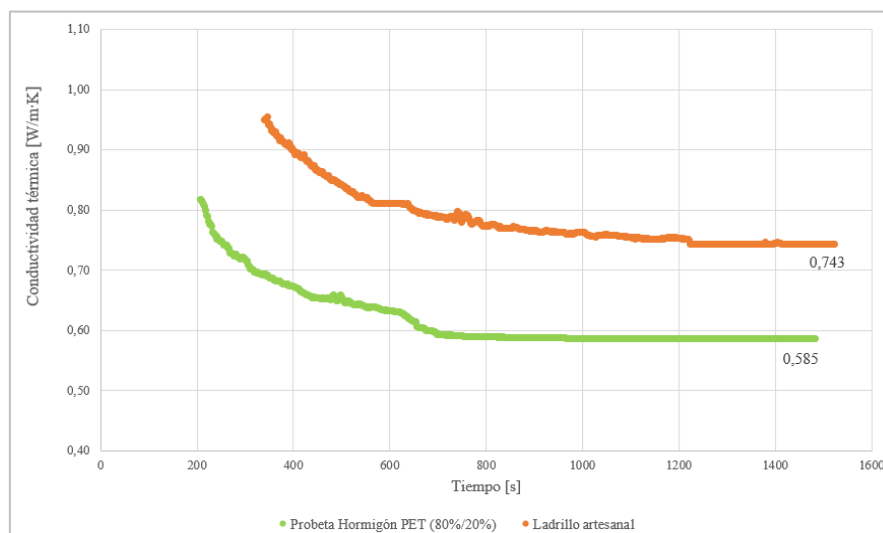
Fabricación de probetas de hormigón con PET							
Unidad	\$/unidad						
Ítem	Unidad	Rendimiento unitario	unidad	Precio unitario	Unidad	Precio total	Unidad
<b>Mano de Obra</b>							
Maestro ladrillero	Día	80	Unidad/día	\$17.200	\$/día	\$215	\$/unidad
				Mano de obra total		\$215	\$/unidad
				Leyes sociales (25%)		\$54	\$/unidad
				Total		\$269	\$/unidad
<b>Equipos</b>							
Betонера	Día	80	Unidad/día	\$8.000	\$/día	\$100	\$/unidad
				Total		\$100	\$/unidad
<b>Materiales</b>							
Cemento (Saco 25 kg)	Saco	40	unidad/saco	\$4.000	\$/saco	\$100	\$/unidad
Arena	m <sup>3</sup>	1047	unidad/m <sup>3</sup>	\$16.000	\$/m <sup>3</sup>	\$15	\$/unidad
PET (RECICLADO)	kg	7	unidad/kg	\$0	\$/kg	\$0	\$/unidad
Agua	m <sup>3</sup>	2150	unidad/m <sup>3</sup>	\$260	\$/m <sup>3</sup>	\$0	\$/unidad
				Perdidas (5%)		\$6	\$/unidad
				Total materiales		\$121	\$/unidad
				<b>Total</b>		<b>\$490</b>	<b>\$/unidad</b>

El costo asociado a la fabricación de una probeta de hormigón con PET reciclado con proporción de 80% de hormigón y 20% PET, alcanza el valor neto de \$490.

Esto conlleva a un aumento de aproximadamente un 73% en su valor neto, ya que la producción de la probeta de hormigón con PET, por el hecho de usar hormigón como aglomerante, requiere de materiales con mayor costo que un ladrillo artesanal.

## 5 CONCLUSIONES

La implementación de un material de hormigón con adición de PET reciclado aporta a la disminución de contaminación por plástico de un solo uso en el planeta, ya que disminuye la cantidad de plástico de origen domiciliario sin utilidad. En este caso, se logra implementar un material constructivo de mejor aislación térmica, ya que la transmitancia térmica de la probeta de hormigón PET (80%/20%) es de 0,585 W/m·K, mientras que la del ladrillo artesanal bordea los 0,743 W/m·K.

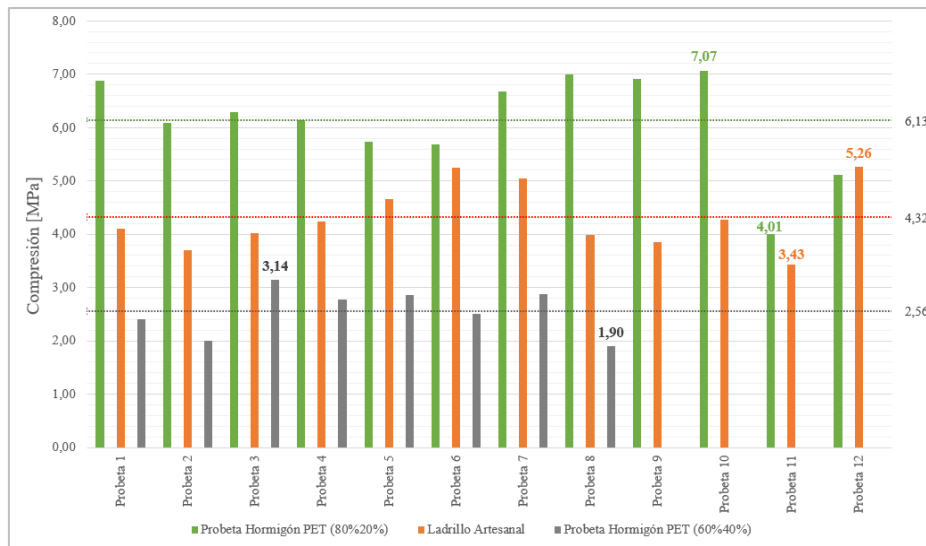


**Figura 18:** Conductividad térmica para los materiales analizados.

Fuente: Elaboración propia.

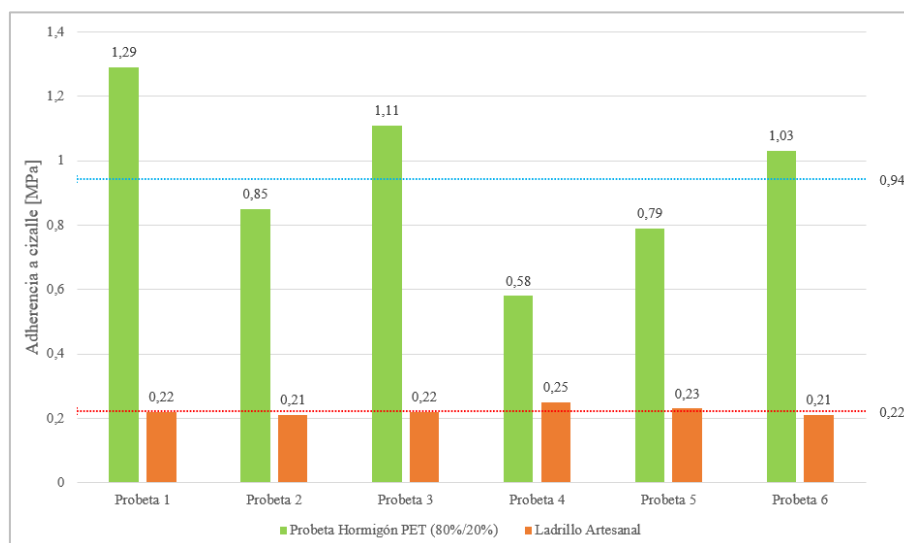
Además, el bloque de hormigón con adición de PET reciclado y triturado cumple satisfactoriamente cada una de las propiedades medibles de acuerdo con la norma NCh 167, Of. 2001, y de la misma forma, supera en cada una de ellas a su material comparativo, el ladrillo artesanal.

Cada una de las propiedades analizadas fue superada satisfactoriamente bajo el estándar del mismo procedimiento y condiciones de ensayo en cada probeta analizada. En el caso de la compresión para la probeta de hormigón PET (80%/20%), se supera en un 41,90% la resistencia media obtenida en las unidades de ladrillo artesanal, mientras que para la probeta de hormigón PET (60%/40%), no se cumple este criterio, ya que el ladrillo artesanal tiene una resistencia media de un 40,74% mayor al producto fabricado.



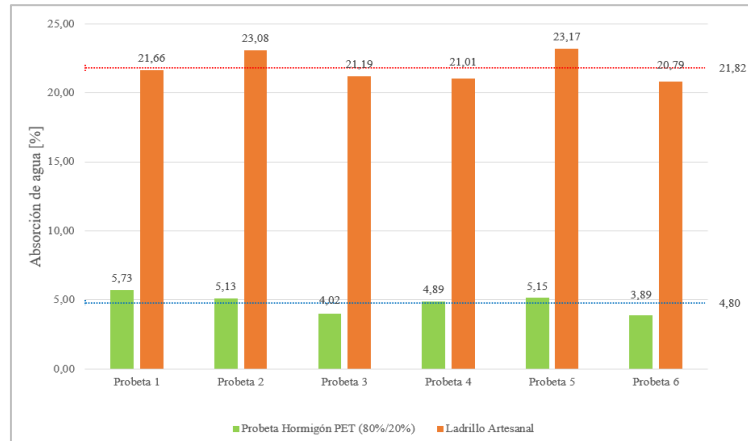
**Figura 19:** Resistencia máxima a compresión para los materiales analizados.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Respecto a la adherencia a cizalle, ambos productos cumplen con el requerimiento mínimo estipulado en la norma de 0,18 MPa. En el caso de la probeta de hormigón PET (80%/20%) la adherencia a cizalle es de 0,94 MPa, mientras que para el ladrillo artesanal es de 0,22 MPa.



**Figura 20:** Adherencia a cizalle para los materiales analizados.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Para comparar la absorción de agua entre productos se debe cumplir con un valor máximo de 22%. Según esto, se tiene que la probeta de hormigón PET (80%/20%) posee un menor valor en este parámetro (4,80%), mientras que el ladrillo artesanal resulta en un indicador más desfavorable con un 21,82%.

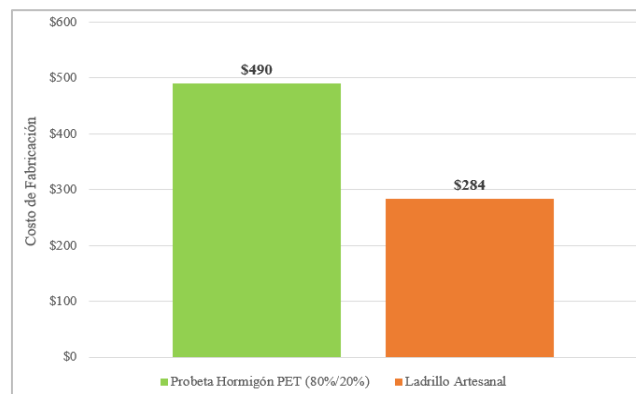


**Figura 21:** Absorción de agua para los materiales analizados.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Respecto a la succión de agua, para la cual la normativa no estipula valores mínimos ni máximos, se tiene que la succión en la probeta de hormigón PET (80%/20%) es de  $0.015 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$ , resultando ser muy inferior a la capacidad de succión que presenta el ladrillo artesanal que corresponde a  $0.163 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$ .

Considerando que una botella de gaseosa de 1,5 L tiene un peso aproximado de 42 g y que en cada probeta para la dosificación de 80% de hormigón y 20% de PET reciclado el peso aproximado de este material incluido en dicha probeta es de 145,7 g da un total aproximado de 3.5 botellas plásticas recicladas, lo que extrapolado a un muro de  $1 \text{ m}^2$ , se recicla una cantidad aproximada de 203 botellas con este material. Además, si se logra optimizar la cantidad de PET reciclado en la mezcla, estos valores pueden aumentar valorizando aún más este material por sus propiedades mecánicas y también de aislación térmica.

Finalmente, el análisis de costo por unidad indica que el valor neto de un ladrillo artesanal bordea los \$284 mientras que el valor neto de una probeta de hormigón PET (80%/20%) es de \$490. Este último se debe a que se utiliza el cemento como aglomerante, por lo que podría disminuir su precio si se encuentra alguna alternativa más económica para fabricar el producto.



**Figura 22:** Costo asociado a la fabricación de los materiales analizados.  
**Fuente:** Elaboración propia.

## 6 RECOMENDACIONES

Si bien el material cumple con las exigencias mínimas solicitadas en la norma, se puede optimizar aún más sus propiedades llevando el material al extremo de cumplir con las exigencias mínimas establecidas, y de esta misma manera incluir un mayor porcentaje de adición de PET, aumentando aún más la cantidad de botellas presentes en cada bloque, reduciendo en mayor medida la cantidad de plástico de origen domiciliario.

Se recomienda la fabricación de probetas con un mayor porcentaje de PET, considerando que debe ser mayor a un 20% del volumen de la probeta y mucho menor a un 40% del mismo para lograr una probeta que cumpla estrictamente con los valores mínimos solicitados en la norma NCh 167, Of. 2001.

Otra recomendación es añadir aditivos a la dosificación de hormigón, con el fin de obtener mejores resultados en cuanto a las resistencias mecánicas de las probetas.

También tener en cuenta que el fragüe de las probetas no fue el óptimo, por lo que se recomienda realizar adicionalmente el proceso de curado a las probetas fabricadas. Lo que eventualmente podría mejorar la probeta para los ensayos mecánicos aumentando la resistencia del hormigón.

Se recomienda variar la dimensión del ancho igual a 14,5 cm por una dimensión menor y verificar si de esta manera, manteniendo el porcentaje de 20% de PET reciclado, la probeta logra cumplir con las sollicitaciones mínimas exigidas, resultando así en un espécimen más esbelto, lo que generaría muros de menor espesor y a su vez menor peso propio del mismo, pero deberá necesariamente cumplir con todos los valores mínimos presentados en este documento para cada ensayo realizado.

El costo de fabricación de una probeta de hormigón con PET reciclado es mayor que el costo de un ladrillo artesanal, lo que de mejorar la dosificación para el producto fabricado con una mayor cantidad de PET, podría reducir su costo de fabricación.

Otra manera de reducir el costo de fabricación es mejorar la dosificación del hormigón para así obtener un hormigón de mejor calidad, al que se le pueda añadir una mayor cantidad de PET.

Se recomienda ocupar áridos livianos en reemplazo de arena, para luego comprobar las resistencias mecánicas de la probeta, de manera que si este experimento concluye con una resistencia mecánica superior al mínimo indicado por la norma, realizar también el análisis de costo, ya que al reducir su peso excesivo por la cantidad de árido ocupado en las probetas, la arcilla expandida podría lograr disminuir el costo de fabricación.

Otra recomendación es fabricar las probetas con reemplazo de un porcentaje de arena de por relave de cobre, ya que este material es un desecho de la minería, el cual podría eventualmente otorgar resistencias similares y de esta manera disminuir el costo asociado en la fabricación.

De manera similar a lo anterior, se propone el reemplazo de un porcentaje de cemento por cal, de esta manera se disminuye el costo asociado al material de mayor valor dentro de la fabricación de las probetas, siempre y cuando las resistencias mecánicas cumplan con los valores mínimos exigidos por la normativa vigente.

Se recomienda para el ensayo de transmitancia térmica, utilizar un equipo aún más hermético que impida en mayor grado la transferencia de calor del sistema con el exterior, esto para disminuir el error experimental en la medición de este parámetro.

## 7 REFERENCIAS

- **Charles D., Kimman L., Saran N.** (2021). Minderoo Foundation - The plastic waste makers index.
- **Costa Del Pozo, A.** (2012). Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla, Tesis de Magíster, Escuela de Arquitectura, Energía y Medio Ambiente Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona-España.
- **Fundación Chile.** (2021). Reportabilidad pacto chileno de los plásticos – Data 2019.
- **Infante J. & Valderrama C.** (2019). Technical, Economic and Environmental Analysis of the manufacture of concrete blocks with Recycled Terephthalate Polyethylene (PET).
- **Instituto Nacional de Normalización.** (1967). Norma chilena 158, Cementos – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento.
- **Instituto Nacional de Normalización.** (1985). Norma chilena 170, Hormigón – Requisitos generales.
- **Instituto Nacional de Normalización.** (1997). Norma chilena 2123, Albañilería confinada – Requisitos de diseño y cálculo.
- **Instituto Nacional de Normalización.** (2001). Norma chilena 167, Construcción – Ladrillos cerámicos - Ensayos.
- **Instituto Nacional de Normalización.** (2007). Norma chilena 853, Acondicionamiento térmico – Envolvente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas.