

EFFECTO DE LA ESBELTEZ Y ESCALA EN EL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FILAMENTOS DE PLA

Cristóbal Neira Ramírez¹, Mauricio Villagrán Valenzuela², Nelson Maureira Carsalade³

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio del comportamiento mecánico de probetas de mortero reforzadas con filamento de Ácido Poli Láctico (PLA por sus siglas en inglés) variando la sección y la escala en un 50%. Los refuerzos fueron construidos utilizando manufactura aditiva por medio de una impresora 3D. La geometría de éstos corresponde a un perfil en H con estructura tipo enrejado y una relación de volumen del 17%, que se replicó para todos los modelos. Las muestras se sometieron a ensayos de compresión y flexión (ensayo de 3 puntos) para estudiar su comportamiento. El refuerzo de PLA aumentó la resistencia de las muestras de mortero con respecto a sus homólogas no reforzadas hasta en un 16,5% en las muestras pequeñas y en un 45,4% en las muestras a escala. Al mismo tiempo, las muestras reforzadas con secciones de 30x40 mm y 45x60 mm tuvieron una mayor resistencia frente a sus homólogas de 40x30 mm y 60x45 mm con un incremento del 2,3% y 6,4% respectivamente. Por otro lado, el aumento del 50% de las dimensiones de las probetas dio lugar a una disminución de la resistencia. Así mismo, se observó que las probetas de mortero reforzado presentaron un mecanismo de fallo similar entre las probetas pequeñas y grandes en los ensayos a 28 días. Por último, los resultados de compresión a 28 días mostraron una disminución de la resistencia con respecto a las probetas no reforzadas.

Palabras clave: Acido poli láctico (PLA), impresión 3D, mortero, flexión, compresión, mecanismo de falla.

ABSTRACT

This work presents a study of the mechanical behavior of mortar specimens reinforced with Poly Lactic Acid (PLA) filament, varying the section and scale by 50%. The reinforcements were built using additive manufacturing by means of a 3D printer. Their geometry corresponds to an H profile with a lattice-like structure and a volume ratio of 17%, which was replicated for all models. The specimens were subjected to compression and flexural tests (3-point test) to study their behavior. PLA reinforcement increased the strength of the mortar specimens with respect to their unreinforced counterparts by up to 16.5% in the small specimens and 45.4% in the scaled specimens. At the same time, the reinforced samples with 30x40 mm and 45x60 mm sections had higher strength versus their 40x30 mm and 60x45 mm counterparts with a variation of 2.3% and 6.4%, respectively. On the other hand, the 50% increase in specimen dimensions resulted in a decrease in strength. Likewise, it was observed that the reinforced mortar specimens presented a similar failure mechanism between small and large specimens in the 28-day tests. Finally, the compression results at 28 days showed a decrease in strength with respect to the unreinforced specimens.

Keywords: Poly lactic acid (PLA), 3D printing, mortar, bending, compression, failure mechanism.

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de soportar grandes cargas hace del hormigón el material más usado para la construcción de infraestructuras en todo el mundo. Su resistencia a la compresión lo hace apropiado para elementos tales como columnas y arcos, no así, en vigas. Cuando estas últimas se someten a tensiones de flexión o tracción, su resistencia se ve altamente reducida por lo que se deben utilizar refuerzos de acero para mejorar su respuesta [1]. No obstante, el hormigón cuando es agrietado expone al refuerzo a condiciones ambientales desfavorables. Estas a la vez, pueden verse afectadas por la patología de la corrosión, disminuyendo así las propiedades del acero, afectando directamente la vida útil de diseño de los elementos estructurales [2].

Teniendo en consideración lo anterior, nuevas técnicas de fabricación de morteros y refuerzos han sido propuestas y estudiadas buscando una mejora en la respuesta de los elementos. Entre ellas se encuentra la fabricación de refuerzos mediante distintas metodologías de impresión 3D. Fariña, I., et al., 2016, investigó reforzar al hormigón con fibras poliméricas y metálicas tipo barras [3] para analizar la respuesta a la flexión y tenacidad. Posteriormente, Salazar, B., et al, 2020, fabricaron refuerzos octet de PLA variando el volumen de refuerzos [4]. Misma metodología utilizaron Xu, Y., et al., 2021, donde analizaron el efecto de la concentración de refuerzos en zonas de mayor tensión [5]. Por último, en el trabajo realizado por Mora et al., 2021 [6], se analizó la factibilidad de usar la impresión 3D para fabricar refuerzos para elementos de hormigón mediante el análisis de una serie de refuerzos tipo enrejados y ensamblados a presión. En Figura 1 se muestran las configuraciones de refuerzos mencionadas en los artículos referenciados en este párrafo.

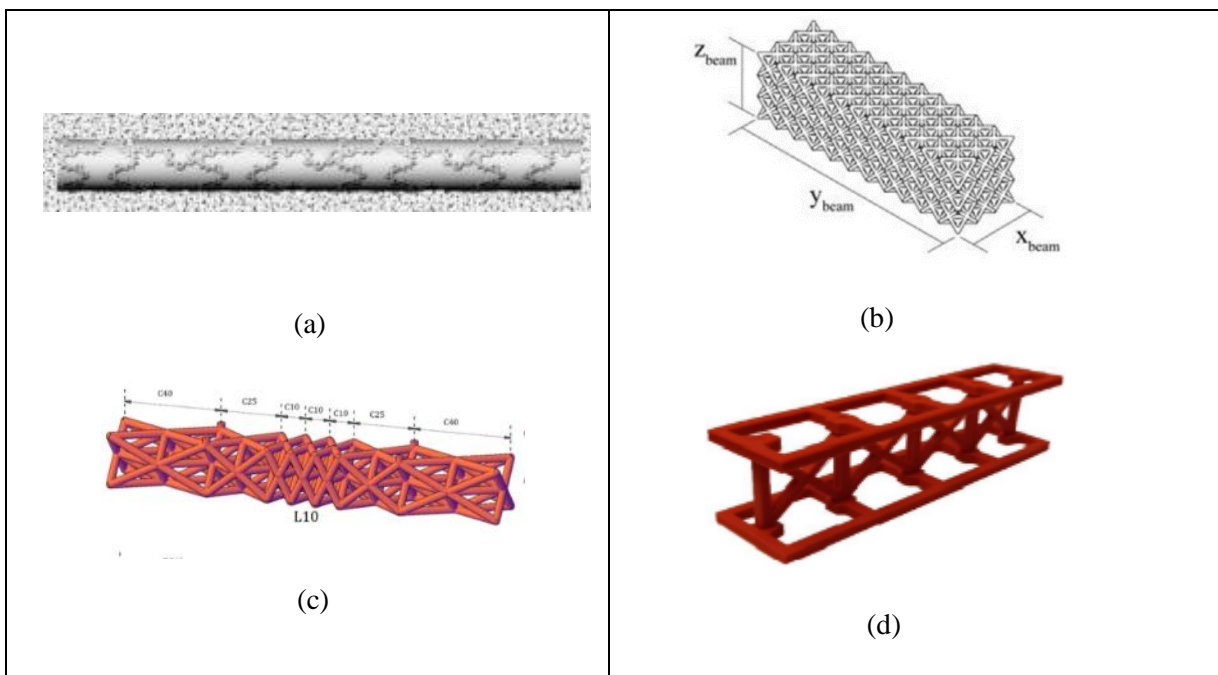


Figura 1: Tipos de refuerzos: (a) polímero con forma de barra, (b) celdas octet con variación de volumen, (c) celdas unitarias concentradas en el centro y (d) refuerzo tipo enrejado ensamblado a presión. (Fuente: [3-6])

La técnica de impresión 3D utilizada por los autores citados, a excepción de Fariña, I., et al., 2020 (impresión por inyección de tinta), corresponde a deposición de material fundido por capas o FDM. Esta metodología consiste en la extrusión de un material termoplástico, (como el ABS, PC y PLA) [7], por una boquilla precalentada que va depositando el material sobre una cama de impresión, ver Figura

2. La ventaja de estas impresoras es que son más asequibles en costo que otros métodos, a la vez, que su velocidad de impresión es mayor. Dentro de los materiales más utilizados por la impresión FDM está el Ácido Poli Láctico o PLA, plástico biodegradable normalmente hecho de maíz o papas, debido a su alta velocidad de impresión y por tener buena resolución de impresión en el fabricado de las piezas [8].



Figura 2: Impresión en curso tipo FDM.

Aprovechando la tecnología de la impresión 3D a disposición, es que en esta investigación se pretende estudiar el comportamiento de elementos de hormigón reforzado con Acido Poli láctico (PLA). Mediante una única configuración de refuerzo que fue en la proporción óptima propuesta por Mora et al., 2021, se caracterizó la respuesta de viguetas por efecto de la esbeltez en su sección y la variación en la escala. Por medio de ensayos de flexión y compresión a muestras con y sin refuerzo de PLA, es que se busca cuantificar la ganancia o pérdida de la capacidad de carga.

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño e Impresión

La base de diseño para este trabajo corresponde a un refuerzo tipo enrejado de sección H, similar al utilizado por Mora et al., 2021 [6]. El refuerzo conocido como R2, presenta una proporción de volumen del 17% de una probeta de un moldaje estandarizado de 40x40x160 mm, siendo esta proporción de refuerzo replicada para todas las armaduras que se fabricaron. Se fundamenta la selección de esta armadura por el número de elementos que componen al refuerzo y su comportamiento a flexión de los ensayos de Mora et al., 2021 [6]. En Figura 3 (a) se muestra el resultado de impresión de un refuerzo y en Figura 3 (b) se muestra los refuerzos ensamblados.

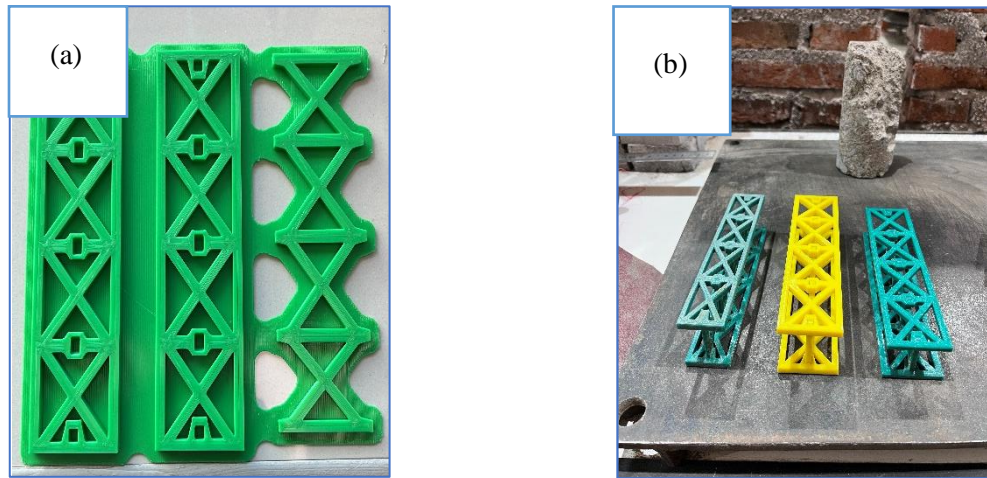


Figura 3: Refuerzos de PLA utilizados. (a) resultado de la impresión. (b) refuerzos ensamblados.

A continuación, se modificó la geometría de la sección del modelo original (40x40 mm) utilizando el software AutoCAD 2020, disminuyendo el ancho de la base y la altura de la sección de la vigueta, obteniendo secciones de 30x40 mm y 40x30 mm para que puedan tener cabida en los moldes RILEM. A la vez, se definió un aumento en el tamaño de la probeta original en un 50% en todas sus dimensiones. Las dimensiones de las armaduras se visualizan en Tabla 1, así mismo, en Figura 4 se muestra vista de sección transversal y longitudinal de viga indicando que significa la nomenclatura de Tabla 1.

Tabla 1: Dimensiones de refuerzo de PLA.

	Ancho (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
R2_40/40/160	38	40	158
R2_30/40/160	28	40	158
R2_40/30/160	38	30	158
R2_60/60/240	58	60	238
R2_45/60/240	43	60	238
R2_60/45/240	58	45	238

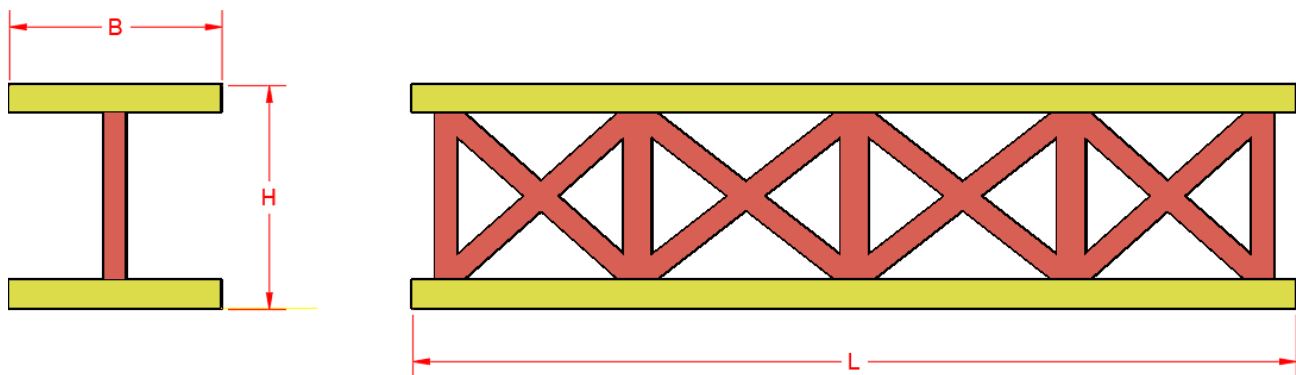


Figura 4. Descripción de nomenclatura de probetas. H es la altura del refuerzo; B es el ancho del ala del refuerzo; L es el largo del refuerzo (R2_B/H/L).

Se utilizó el software *Creativity Slicer 4.8.0* para procesar los archivos de extensión “STL” que provienen de *AutoCAD* y definir los parámetros de impresión, ver Tabla 2. Se optó por incorporar una capa de impresión como base para los refuerzos y así evitar irregularidades en la fabricación. El equipo de impresión donde se fabricaron los refuerzos corresponde a un sistema FDM del modelo *Creativity CR-10 Smart*, ver Figura 5. Dicha impresora opera con filamento de ácido poli láctico (PLA) Cicla pla del fabricante *Cicla3D*. El tiempo promedio de impresión de probetas pequeñas no superó las 8 horas de fabricación, en cambio, para los refuerzos escalados estos se imprimieron en un tiempo de hasta 16 horas.



Figura 5: Impresora *Creativity CR-10 Smart*.

Tabla 2: Ajuste de impresión.

Parámetros	
Altura de capa (mm)	0,2
Grosor de la pared (mm)	0,6
Recuento de líneas de pared	2
Grosor superior/inferior (mm)	0,8
Capa superior/inferior	2
expansión horizontal (mm)	0
Densidad (%)	100
Patrón de relleno	Rejilla
Temperatura de impresión (°C)	215
Temperatura de la placa de impresión (°C)	60

Inicialmente se había optado por una configuración en la cual se orientaba el filamento en la dirección de los componentes de los elementos del refuerzo (largo, ancho y diagonales). Sin embargo, esta configuración generaba que las capas de PLA en el centro no se adhirieran entre sí, por lo que tuvo que modificarse por un relleno en 45° que dio más uniformidad a la impresión de los elementos.

2.2 Confección de probetas

La confección de probetas pequeñas se llevó a cabo en moldes RILEM, ver Figura 6 (a). En cuanto a los modelos escalados, sus moldes fueron fabricados en madera, ver Figura 6 (b). Posteriormente, en la fabricación del mortero se utilizó una dosificación de cemento y arena de 1:5 y razón agua/cemento igual

a 0,55. Una vez pesado cada material, estos son llevados al mezclador marca *Controls Model 65-L0005* siguiendo el procedimiento la norma NCh 158 Of. 67 [9].

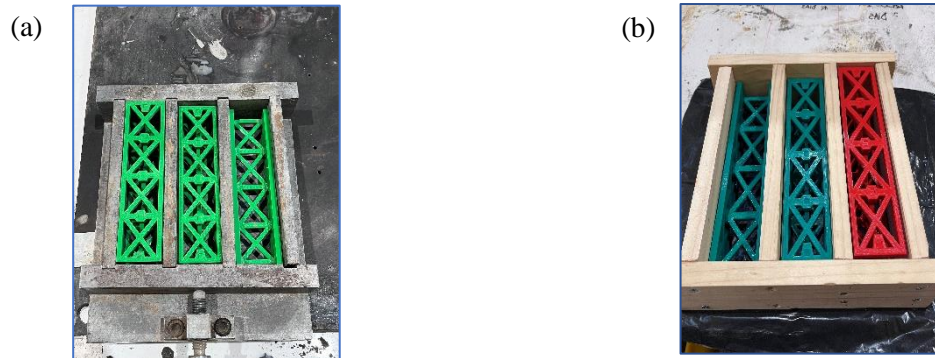


Figura 6: Refuerzos de PLA en (a) Probetas RILEM y (b) Probetas fabricadas en madera.

Una vez que se confecciona el mortero, este se vierte por capas (2) en cada moldaje, y cada capa se debe compactar mediante un movimiento de subida de hasta 15 mm y se deja caer libremente, realizándose este procedimiento hasta 60 veces por cada capa de mortero. Así mismo, como el refuerzo se extiende en toda la altura de viga, esta no lleva recubrimiento. Cada probeta confeccionada permanece en sus moldes entre 20 y 24 hrs. Pasado este plazo los moldes deben desarmarse para extraer las probetas, siendo trasladados a recipientes con agua saturados en cal donde son sumergidas en posición vertical, ver Figura 7. Las probetas son dejadas ahí hasta la fecha en que les corresponde ser ensayadas, ver Tabla 3. Por cada viga con refuerzo confeccionada se fabricó una probeta patrón sin refuerzo, sólo con mortero.

Tabla 3: Programación de confección y ensayo de probetas.

Nomenclatura	Confección		Ensayo	
	7 días	28 días	7 días	28 días
P_B/H/L (*)	11-ago	11-ago	18-ago	08-sept
R2_B/H/L	07-sept	11-ago	14-sept	08-sept

(*) P_B/H/L corresponde a la nomenclatura asignada a las probetas sin refuerzos.



Figura 7: Recipiente de curado para probetas.

2.3 Ensayos mecánicos

Se estudió el comportamiento mecánico de las probetas de mortero con y sin refuerzo mediante ensayos de flexión y compresión conforme a la NCh 158 Of. 67. Los ensayos se realizaron a 7 y 28 días desde la confección de las muestras.

Ensayo a flexión

El ensayo de flexión con carga P en el centro del vano de la viga se llevó a cabo en la máquina multipropósito *Controls, Model 65-L11G2/C*, la cual incorpora una prensa hidráulica con control de carga de 5.0 kg/s y una distancia entre apoyos de 100 mm. Cada probeta fue testada hasta alcanzar la rotura registrándose la carga última y la resistencia alcanzada. Se ensayaron 2 muestras por tipo de refuerzo y la resistencia correspondió a la media de los datos registrados. En la Figura 8 (a) y 8 (b) se aprecian muestras previas a ser testeadas.

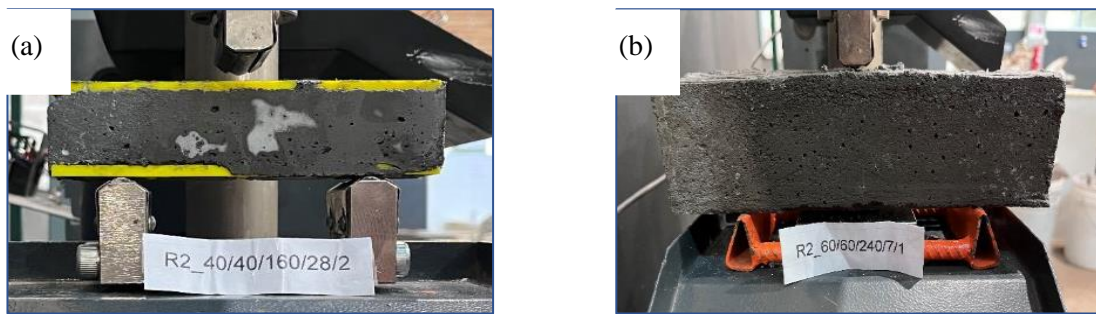


Figura 8: Probetas montadas en máquina de ensayo. (a) R2_40/40/160/28/2 y (b) R2_60/60/240.

Para el caso de probetas escaladas, la máquina *Controls, Model 65-L11G2/C* tuvo que ser modificada para adaptar la distancia de los apoyos de tal manera que la luz de la probeta quedara proporcional a una vigueta de 60x60x240 (mm). La distancia entre apoyos de las muestras más grandes es de 150 mm. Por último, cada ensayo se registró vía fotográfica y de video para visualizar su comportamiento durante la ejecución del ensayo hasta alcanzar la falla de las muestras con y sin refuerzos.

Ensayo a compresión

Se realizó el ensayo de compresión de morteros conforme a la NCh 158 of 67 [9], ocupándose 2 equipos de compresión, la máquina *Controls Model 65-L11G2/C* y una máquina más grande marca *Controls, Model Q0802/B*, para dar cabida a las probetas escaladas con y sin refuerzo. Los trozos resultantes del ensayo de flexión son reutilizados para ser ensayados en las máquinas de compresión mencionadas anteriormente. En Figura 9 (a) y 9 (b) se visualiza la colocación de probetas previo a ser ensayadas.

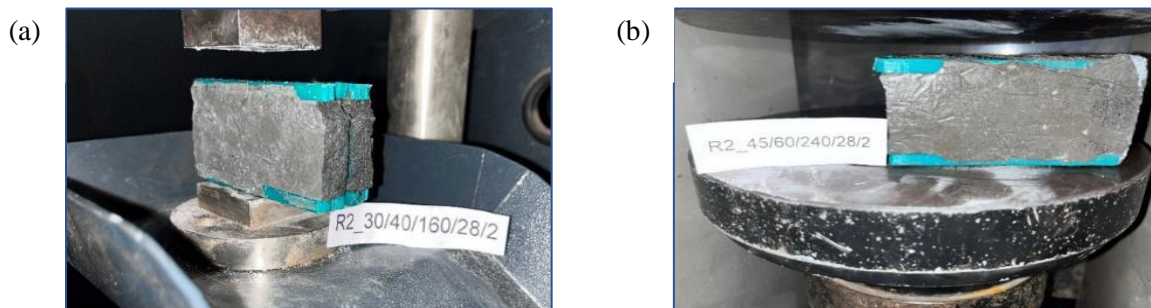


Figura 9: Probetas montadas en máquina de ensayo. (a) R2_30/40/160 y (b) R2/45/60/240.

2.4 Normalización de resultados

Luego de recopilar los resultados de los ensayos respectivos, mediante la ecuación (1), se procede a normalizar los resultados para cuantificar la ganancia o pérdida de capacidad de carga de las probetas reforzadas realizando comparaciones con probetas patrón, variación de sección y aumento de escala.

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

Donde:

N: Valor normalizado.

R: Presión máxima de probeta a estudiar (kgf/cm^2) o carga máxima de probeta a estudiar (ton).

P: Presión máxima de probeta patrón, (kgf/cm^2) o carga máxima de probeta patrón (ton).

3. RESULTADOS

Como se menciona en la sección 2.3, se realizaron ensayos de compresión y flexión a 7 y 28 días. Durante la ejecución de los ensayos de flexión no se tuvo mayores problemas a excepción de aquellas probetas testeadas a 7 días. Esto debido a la rotura muy temprana de algunas de las probetas que no tenían refuerzo una vez aplicado el puntal de carga. También hubo problemas de adherencia en muestras con refuerzo, que ocasionaron que la máquina no finalizara el ensayo.

3.2 Ensayos de flexión

Se realizaron ensayos a flexión a 7 y 28 días a probetas con y sin refuerzo de PLA. Los resultados de flexión se muestran en Figura 10 y 11. Se puede ver que en todas las vigas con refuerzo de PLA mostraron valores de carga y de resistencia superior a sus patrones sin refuerzo. El incremento de la capacidad de carga y resistencia en las probetas RILEM varió según valores normalizados (ecuación 1) desde 0.069 hasta los 0.26 y desde 0.063 hasta 0.154 para las muestras más grandes ensayadas a 28 días (Tabla 4).

Tabla 4: Valores de resistencia normalizados.

Nomenclatura	Valor Normalizado (patrón de 7 días)	Valor Normalizado (patrón de 28 días)
R2_40/40/160	1,744	0,260
R2_30/40/160	6,853	0,165
R2_40/30/160	2,864	0,069
R2_60/60/240	1,156	0,154
R2_45/60/240	0,971	0,454
R2_60/45/240	0,801	0,586

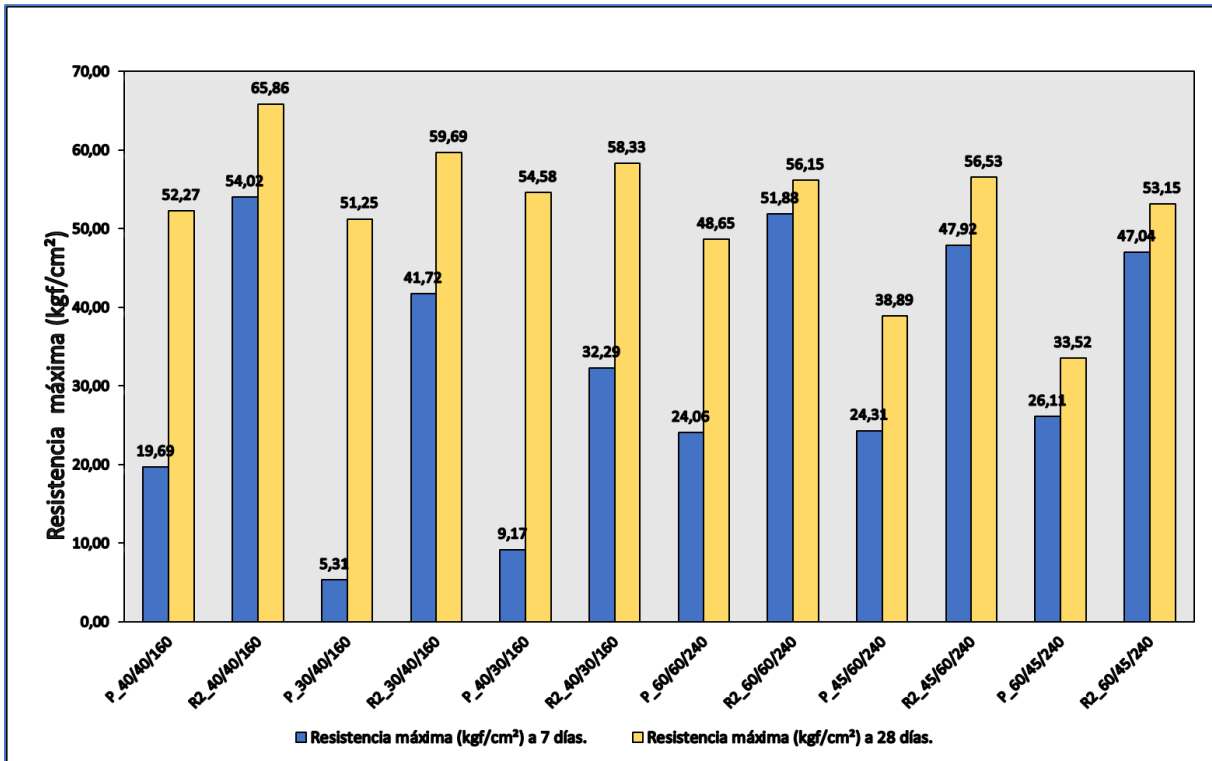


Figura 10: Resistencia a flexión de cada probeta ensayada, en kgf/cm².

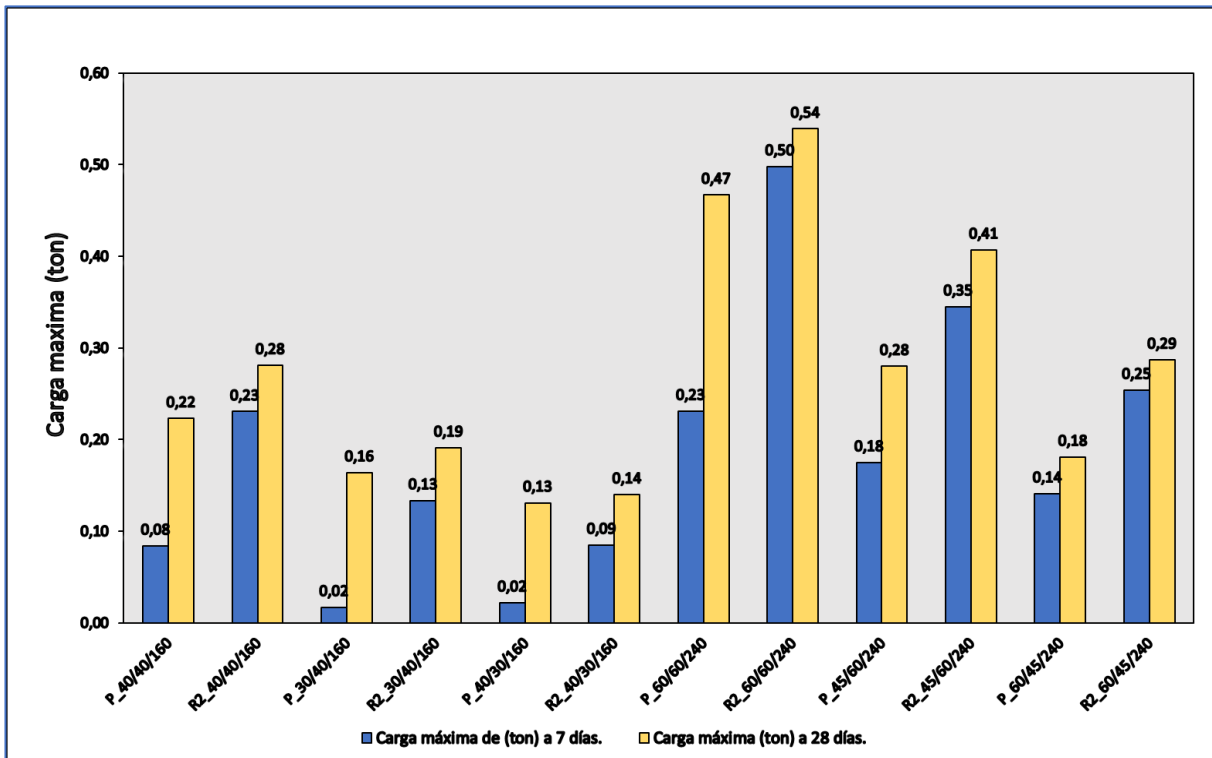


Figura 11: Carga máxima aplicada a cada probeta ensayada, en ton.

La variación de resistencia en las probetas más pequeñas que fueron ensayadas a 7 días fue considerablemente mayor a la de su patrón debido a que estas últimas se rompieron apenas segundos después de aplicado el puntal de carga. Por otro lado, se comparó la variación de la resistencia entre secciones cuadradas y rectangulares (Figura 12), obteniéndose que la resistencia a 28 días es negativa en 0.094 para una sección de 30x40 mm y 0.171 en una de sección de 40x30 mm, en cambio, entre las probetas más grandes la sección de 45x60 mm superó levemente en resistencia a la sección de 60x60 mm en 0.007 de valor normalizado. Esto no ocurrió del mismo modo para la probeta de 60x45 mm con una reducción de hasta 0.403 veces.

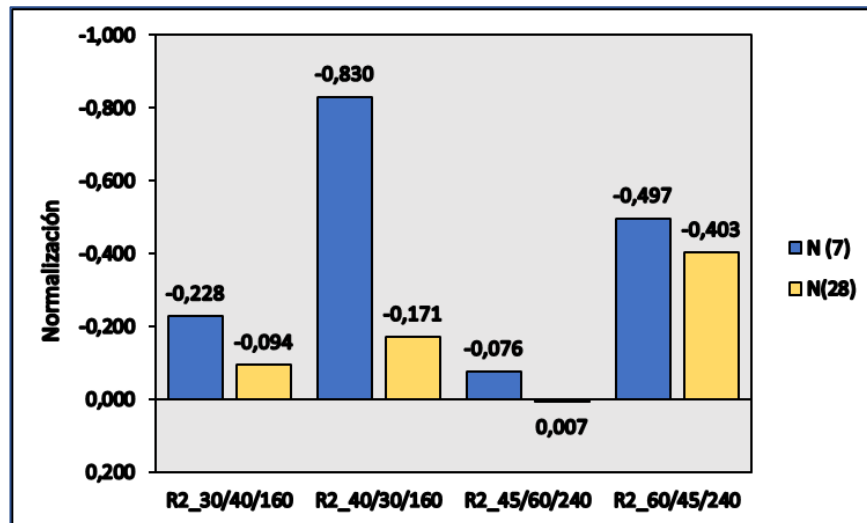


Figura 12: Normalización de resultados a flexión de probetas de sección cuadrada y sección variada.

También fueron comparadas las probetas con secciones de área equivalente (esbeltas y menos esbelta), véase Figura 13. Los resultados arrojaron que las secciones más esbeltas variaron positivamente su resistencia respecto de sus pares menos esbeltos (40x30 mm y 60x45 mm) con valores normalizados de 0.023 y 0.064 respectivamente.

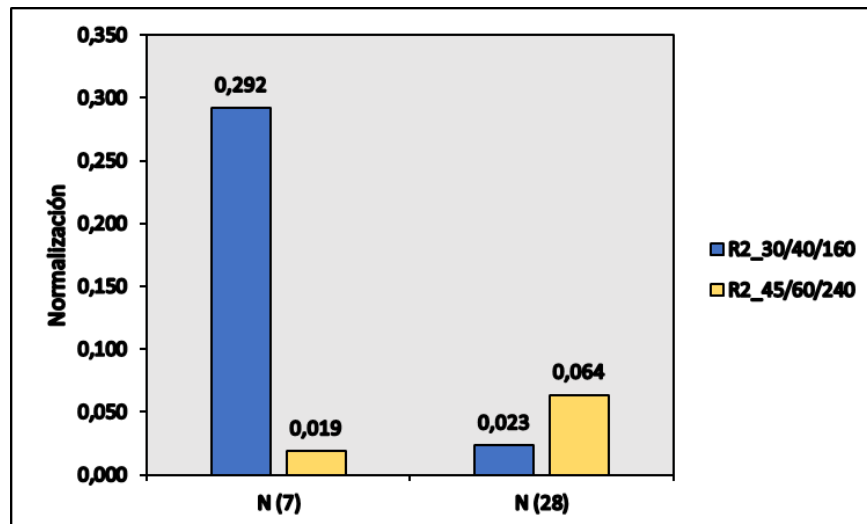


Figura 13. Normalización de resultados a flexión entre secciones equivalentes.

Se analizó el efecto de la escala entre los refuerzos en la resistencia de las probetas. Se determinó que todas las probetas aumentaron su capacidad de carga respecto de sus pares más pequeños, ver Figura 11. Sin embargo, la resistencia que se registra a 28 días (Figura 14) se ve reducida con valores normalizados de 0.053 para una sección de 45x60 mm, 0.089 para sección de 60x45 mm. y 0.147 mm. para el perfil de 60x60. Dichos valores normalizados se muestran en Tabla 5.

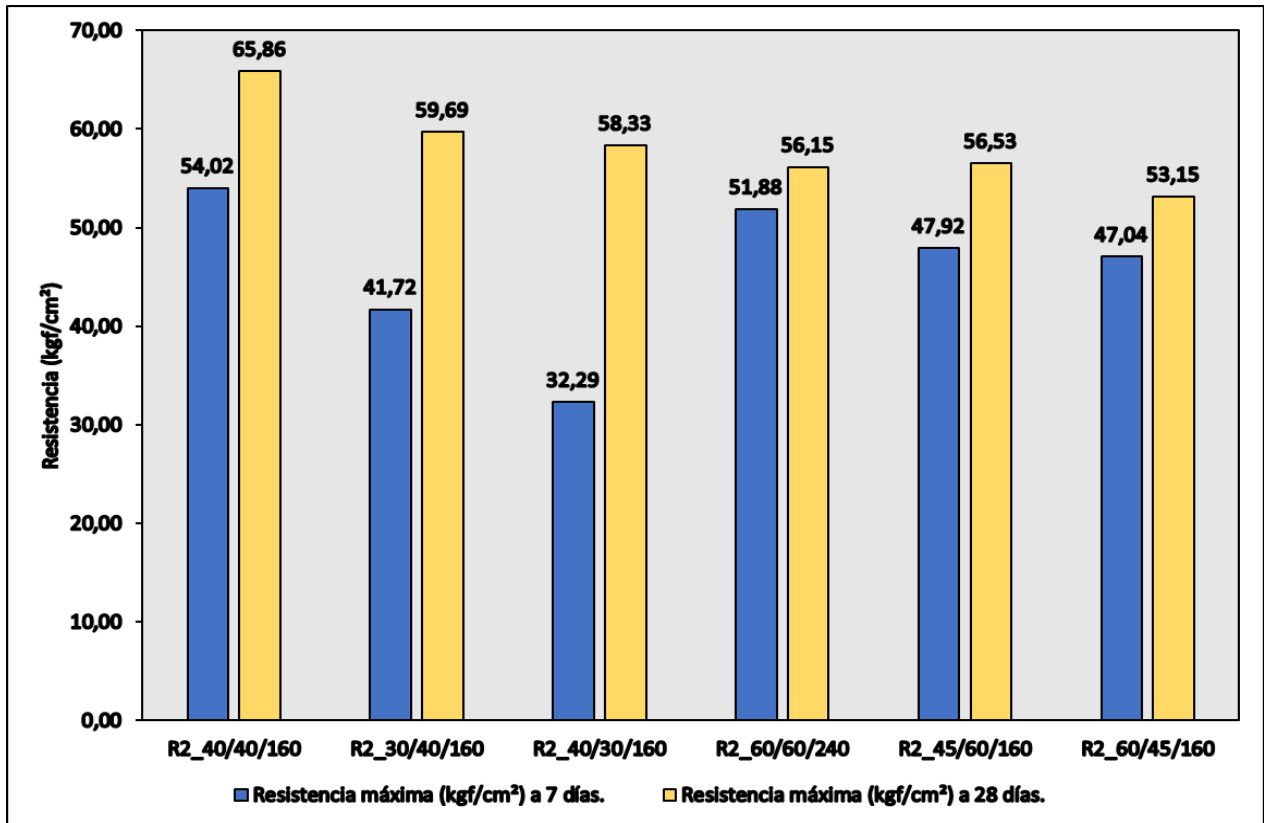


Figura 14: Resultados de resistencia a flexión por efecto de la escala.

Tabla 5: Variación en la resistencia normalizada por efecto de la escala.

Nomenclatura	N (7)	N (28)	Refuerzo patrón
R2_60/60/240	-0,040	-0,118	R2_40/40/160
R2_45/60/160	0,149	-0,053	R2_30/40/160
R2_60/45/160	0,457	-0,089	R2_40/30/160

El modo de rotura de las probetas también es importante, siendo el fallo en pruebas patrón frágil y repentina. En aquellas probetas con refuerzos, la rotura fue menos frágil que sus probetas patrones, especialmente en los ensayos a 28 días, donde el agrietamiento es perfectamente perpendicular en el centro de la viga. Los refuerzos testeados a los 7 días tuvieron modos de rotura variados, siendo posible visualizar rotura de refuerzo en el centro del vano como también fallas cercanas a los apoyos (Anexo 6.1). En la Figura 15 se muestra la rotura en los refuerzos de probetas de tamaño normal y escaladas testeados a 28 días.

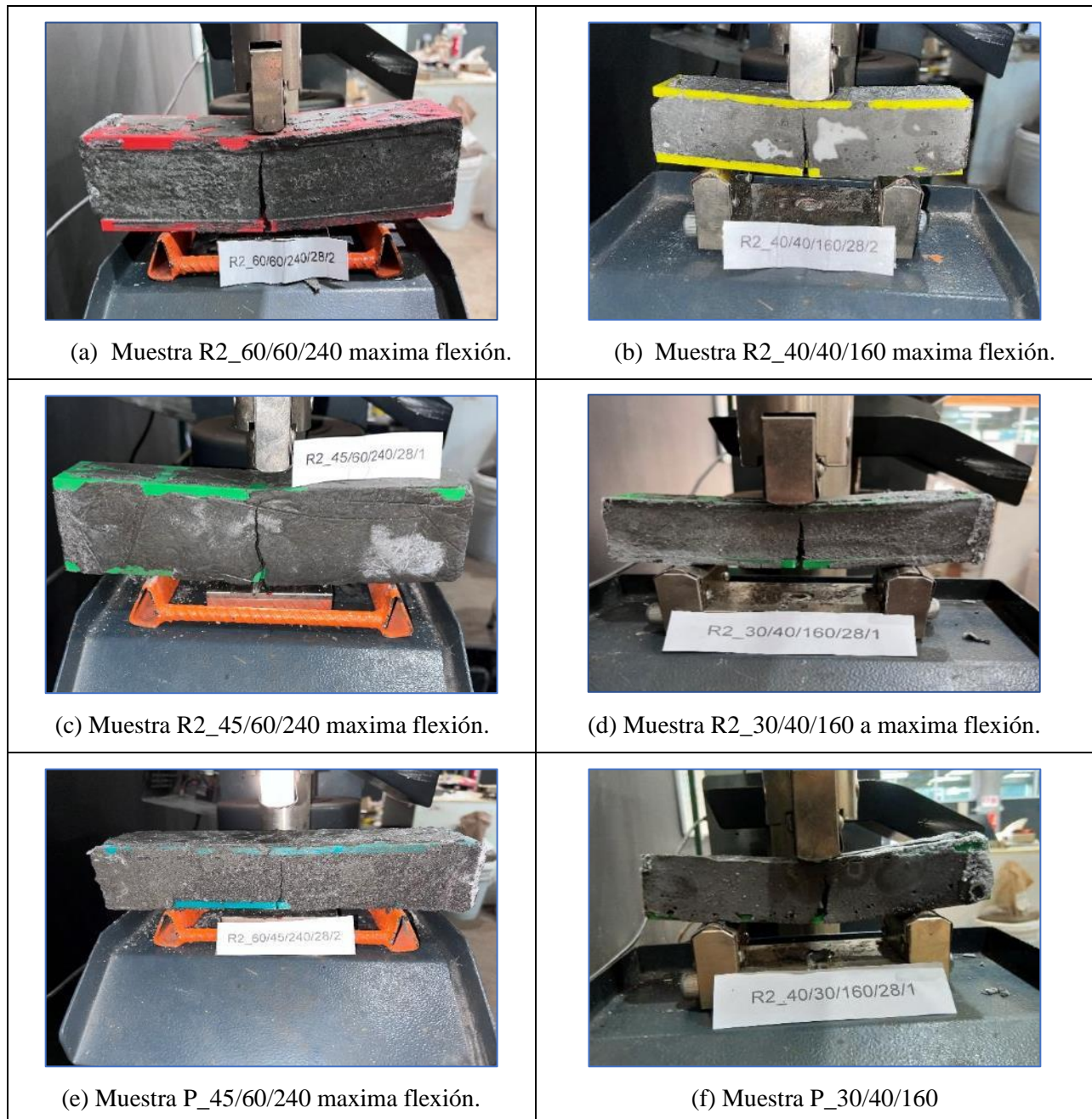


Figura 15: Muestras de probetas con fallas registradas en ensayos de flexión.

3.3 Ensayos de compresión

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron de las mitades de las probetas falladas resultantes de los ensayos de flexión realizados previamente. Estos ensayos arrojaron valores de carga y resistencia menores a sus probetas patrón (Tabla 4), corroborándose así lo obtenido por Mora et al., 2021. Los resultados de la Figura 16 muestran la disminución en la capacidad de carga a compresión en todos los ejemplares ensayados a los 28 días. La mayor pérdida de resistencia correspondió al refuerzo R2_40/40/160 con una pérdida de capacidad normalizada de hasta 0.58 (Tabla 6).

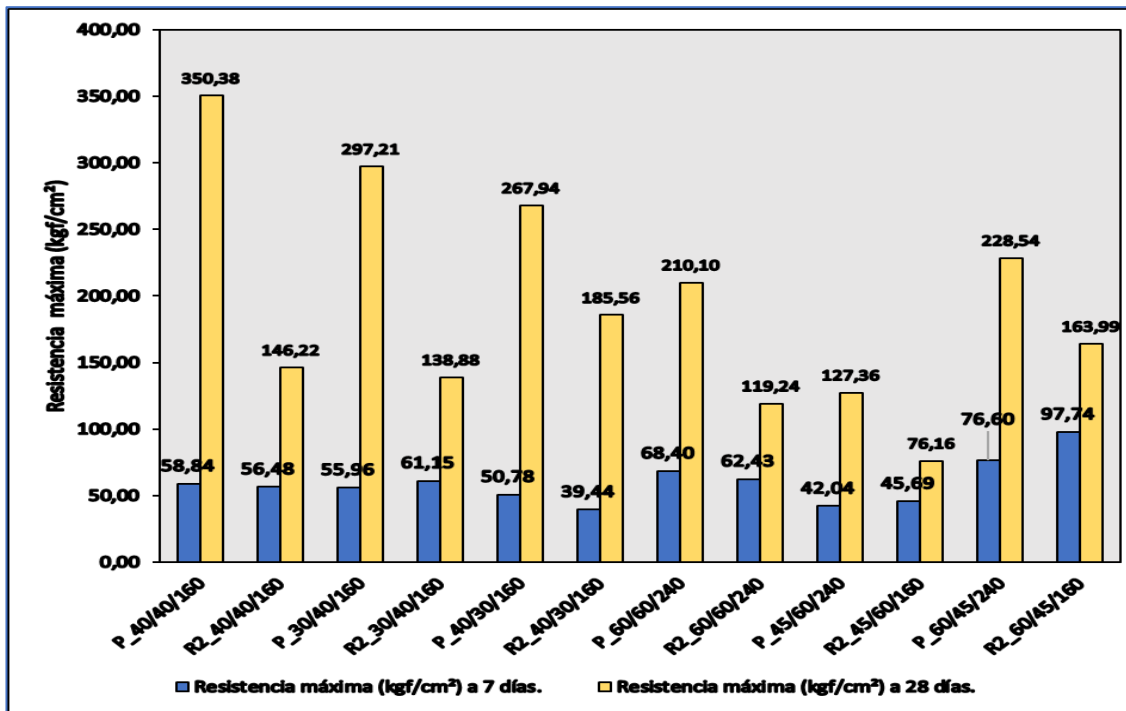


Figura 15: Comparación de ensayos de compresión de probetas con y sin refuerzo.

Tabla 6: Valores de resistencia normalizados de ensayos de compresión.

Nomenclatura	Valor Normalizado (patrón de 7 días)	Valor Normalizado (patrón de 28 días)
R2_40/40/160	-0,040	-0,583
R2_30/40/160	0,093	-0,533
R2_40/30/160	-0,223	-0,307
R2_60/60/240	-0,087	-0,432
R2_45/60/160	0,087	-0,402
R2_60/45/160	0,276	-0,282

3.3 Discusión de resultados

Los resultados de los ensayos de flexión demostraron que el refuerzo R2 de PLA mejora las respuestas de las viguetas sometidas a cargas de flexión en comparación con sus pares sin reforzar. Se realizaron comparaciones entre resultados con los mismos refuerzos, para estudiar el efecto que tiene la esbeltez y la escala de las probetas con refuerzo en la resistencia obtenida. Las vigas con variación de la sección arrojaron una resistencia menor en comparación a las vigas con secciones cuadradas. La única mejora en la resistencia se obtuvo cuando se compararon vigas de secciones equivalentes, obteniéndose que en aquellas con secciones esbeltas su resistencia fuese mayor. (Figura 16). de 40x30 mm. El mismo caso ocurre cuando se comparan las probetas con secciones rectangulares con las probetas de sección cuadrada.

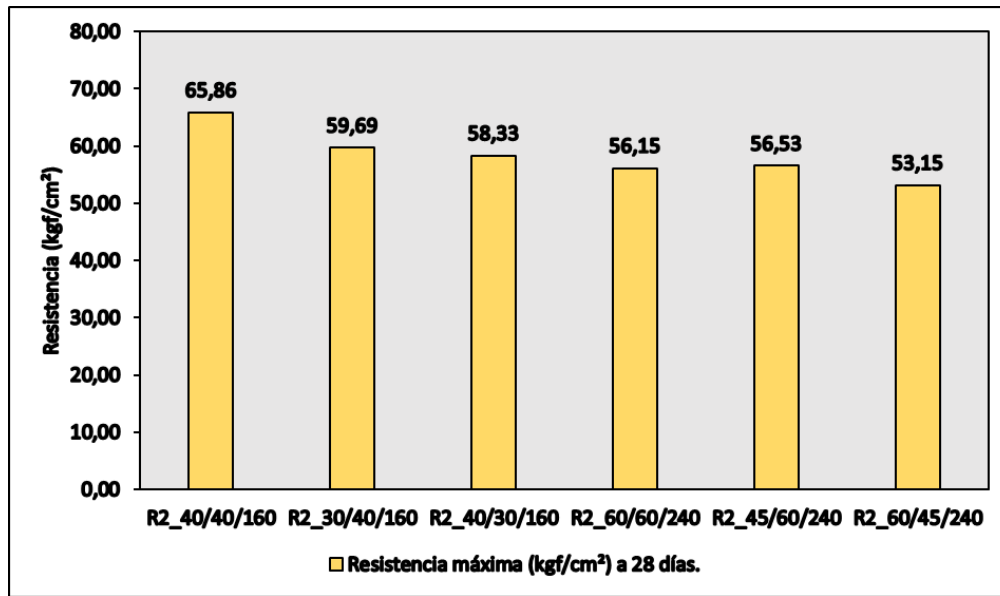


Figura 16: Resultados de resistencia a flexión a los 28 días.

Respecto a la disminución en la resistencia por efecto del aumento de escala, esto puede deberse al proceso de fabricación de la probeta y más específicamente a la configuración utilizada en la impresión. Esto último, debido a que los parámetros de impresión se mantuvieron constantes para todos los refuerzos, lo que generó un comportamiento distinto en cada configuración de refuerzo. En Figura 17 se pueden ver 2 barras de igual altura y largo, pero distinto ancho para entender este efecto. En la barra más ancha, el relleno de disposición paralela a los bordes representa una menor proporción del área que en la barra más angosta.

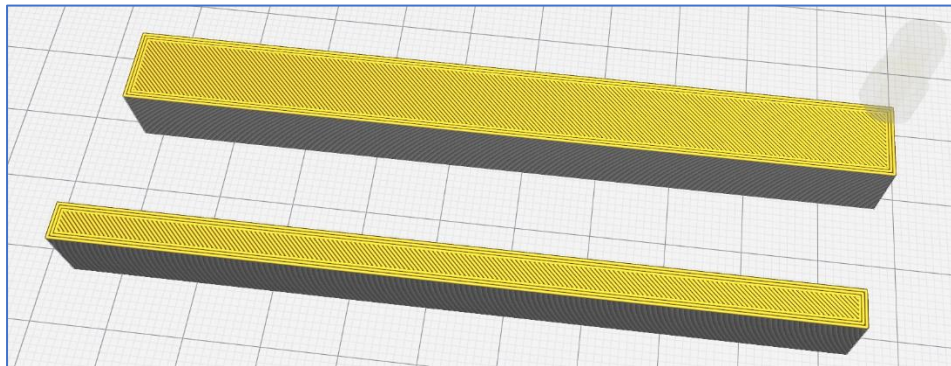


Figura 17: Elementos de largo y altura similares con distintos espesores.

Respecto a la modalidad de falla de las probetas sin refuerzos, esta fue frágil y repentina respecto a aquellas con refuerzo. A si mismo fue posible visualizar la falla del mortero reforzadas principalmente por grietas alineadas con la aplicación de la carga en las muestras de 28 días, en contraste con las ensayadas a 7 días donde aparecieron grietas en 45° hasta romper cercanas a los apoyos (Anexo 6.1). Esto pudo ser por una acumulación de tensiones en los apoyos debido a la poca resistencia aportada por el mortero. Otra observación con respecto al fallo recae en el mecanismo de rotura de las probetas pequeñas y sus pares más grandes reforzadas, viéndose que a los 28 días el mecanismo de falla sigue siendo el mismo (Figura 15).

El refuerzo de PLA redujo la capacidad de compresión del mortero respecto a sus patrones sin refuerzo. Al establecer una comparación en la resistencia con el refuerzo entre probetas de las mismas escalas, es en aquellas secciones menos esbeltas donde se logra obtener una mayor resistencia. El efecto de la escala de las probetas tiene poco efecto en la resistencia de éstas, aun así, la resistencia de las probetas más grandes disminuye.

4. CONCLUSIONES

Se diseñaron y fabricaron refuerzos de PLA por medio de impresión 3D. El refuerzo escogido fue de tipo enrejado continuando con lo propuesto por Mora et al., 2021 con una proporción de volumen de 17%. Se analizaron probetas con diferentes secciones transversales y escala geométrica para analizar el efecto de estas variables en las resistencias obtenidas en ensayos de flexión y compresión a los 7 y 28 días respectivamente.

De los resultados obtenidos en los ensayos de flexión se concluye que el refuerzo de PLA aumenta la capacidad de carga y resistencia respecto de la probeta patrón sin refuerzo. Se obtuvo aumentos de entre 6.9% y 26% de la resistencia en probetas pequeñas y de 15.4% hasta 58.6 % en las probetas más grandes, en ensayos a 28 días.

En aquellas probetas en que fue modificada su sección por una configuración más esbelta, las probetas 30x40 mm y 45x60 mm tuvieron mayor resistencia a flexión en relación con sus homologas menos esbeltas, aun así, estas últimas disminuyeron su resistencia en comparación a las probetas de geometría cuadrada. La variación en la escala entre probetas pequeñas y grandes se redujo en estas ultimas, pudiendo estar relacionada esta disminución a la fabricación del mortero y a parámetros de impresión que no son proporcionales a la geometría y el tamaño de las probetas. Para otras investigaciones se recomienda un relleno de impresión 3D de líneas en dirección del largo de las probetas, sin espesor de pared, para garantizar una continuidad en las propiedades mecánicas del filamento.

El modo de falla a tracción en las probetas con refuerzo testeadas a 28 días también es relevante considerando que el mecanismo observado es similar independientemente de la escala de la probeta. Durante la ejecución de los ensayos de flexión no se observaron problemas de adherencia entre el refuerzo y el mortero, con un comportamiento combinado en el traspaso de la carga entre el refuerzo hacia el mortero hasta que se alcanza la rotura.

El efecto que tiene el refuerzo de PLA en la resistencia de probetas de mortero cuando éstas fueron sometidas a cargas de compresión es negativo ya que reduce en hasta un 58% la resistencia a la compresión en probetas pequeñas y hasta en un 43.2% en las muestras más grandes. El refuerzo ensamblado en secciones menos esbeltas condujo a probetas con mayor capacidad de carga que los otros refuerzos confeccionados en este trabajo.

5. REFERENCIAS

- [1] Darwin, D., C.W. Dolan, y Nilson, A. "Diseño de estructuras de concreto". Edición 12. New York, NY: McGraw-Hill Interamericana. (2001)
- [2] Rodríguez, J. Andrade, C. Izquierdo, D y Peter Tanner, P. "El Eurocódigo 2 y la evaluación de estructuras de hormigón armado con armaduras corroída". Hormigón y Acero. (2014)
- [3] Fariña, I. Fabbrocino, F. Carpentieri, G. Modano, M. Amendola, A. Goodall, R. Feo, L and Fraternali, F. "On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers". Composites. (2016).
- [4] Salazar, B. Aghadasi, P. William, I. Ostertag, C and Taylor, H. "Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete. Materials & Designs". (2020)



[5] Xu, Y. Zhang, H. Gan, Y. and Savija, B. “Cementitious composites reinforced with 3D printed functionally graded polymeric lattice structures: Experiments and modelling”. Additive Manufacturing. (2021).

[6] Mora, N. Villagrán, M. y Maureira N. “Factibilidad de uso de impresión 3D para armadura de refuerzo en elementos de hormigón armado”. UCSC. (2021).

[7] Sandeep and Chhabra, D. “Comparison and analysis of different 3d printing techniques”. IJTET. (2017).

[8] Kamram M, y Saxena A. “A comprehensive study on 3D printing thecnology. MIT International Journal of Mechanical Engineering, Vol 6, No 2, pp. 63-69. (2016).

[9] Instituto Nacional de Normalización. “Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento”. Norma Chilena Oficial. NCh 158 Of67.

6. ANEXO

6.1 Probetas ensayadas a flexión.



Figura A.6.1.1. Muestra P_40/40/160/7



Figura A.6.1.2. Muestra P_40/40/160/28



Figura A.6.1.3. Muestra R2_40/40/160/7/1



Figura A.6.1.4. Muestra R2_40/40/160/28/1



Figura A.6.1.5. Muestra R2_40/40/160/7/2



Figura A.6.1.6. Muestra R2_40/40/160/28/2



Figura A.6.1.7. Muestra P_30/40/160/7



Figura A.6.1.8. Muestra P_30/40/160/28



Figura A.6.1.9. Muestra R2_30/40/160/7/1



Figura A.6.1.10. Muestra R2_30/40/160/28/1



Figura A.6.1.11. Muestra R2_30/40/160/7/2



Figura A.6.1.12. Muestra R2_30/40/160/28/2



Figura A.6.1.13. Muestra P_40/30/160/7



Figura A.6.1.14. Muestra P_40/30/160/28



Figura A.6.1.15. Muestra R2_40/30/160/7/1



Figura A.6.1.16. Muestra R2_40/30/160/28/1



Figura A.6.1.17. Muestra R2_40/30/160/7/2



Figura A.6.1.18. Muestra R2_40/40/160/28/2



Figura A.6.1.19. Muestra P_60/60/240/7



Figura A.6.1.20. Muestra P_60/60/240/28



Figura A.6.1.21. Muestra R2_60/60/240/7/1



Figura A.6.1.22. Muestra R2_60/60/240/28/1



Figura A.6.1.23. Muestra R2_60/60/240/7/2



Figura A.6.1.24. Muestra R2_60/60/240/28/2



Figura A.6.1.25. Muestra P_45/60/240/7



Figura A.6.1.26. Muestra P_45/60/240/28



Figura A.6.1.27. Muestra R2_45/60/240/7/1



Figura A.6.1.28. Muestra R2_45/60/240/28/1



Figura A.6.1.29. Muestra P_60/45/240/7

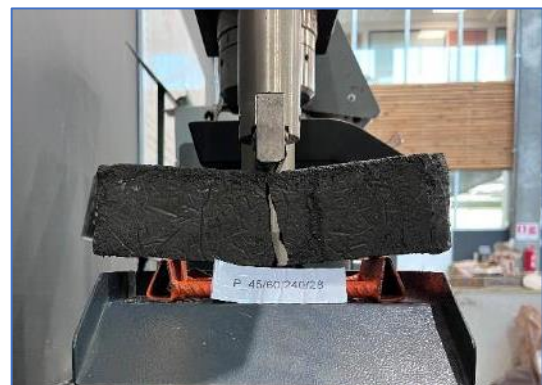


Figura A.6.1.30. Muestra P_45/60/240/28

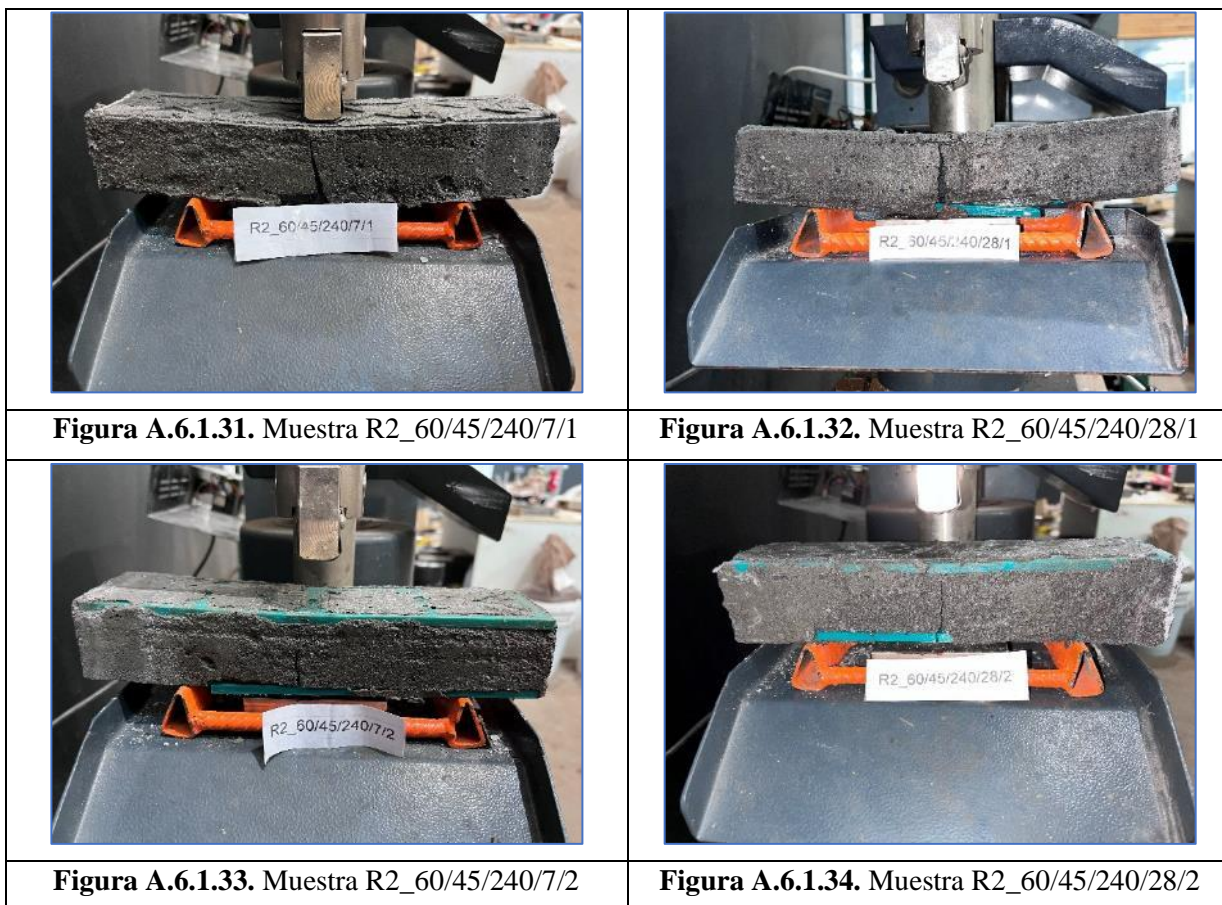


Tabla A.6.1. Resultados ensayos de flexión.

Nomenclatura	Carga máxima de (ton) a 7 días.	Carga máxima (ton) a 28 días.	Resistencia máxima (kgf/cm ²) a 7 días.	Resistencia máxima (kgf/cm ²) a 28 días.	Valor Normalizado a su patrón de 7 días	Valor Normalizado a su patrón de 28 días
P_40/40/160	0,08	0,22	19,69	52,27		
R2_40/40/160	0,23	0,28	54,02	65,86	1,744	0,260
P_30/40/160	0,02	0,16	5,31	51,25		
R2_30/40/160	0,13	0,19	41,72	59,69	6,853	0,165
P_40/30/160	0,02	0,13	9,17	54,58		
R2_40/30/160	0,09	0,14	32,29	58,33	2,864	0,069
P_60/60/240	0,23	0,47	24,06	48,65		
R2_60/60/240	0,50	0,54	51,88	56,15	1,156	0,154
P_45/60/240	0,18	0,28	24,31	38,89		
R2_45/60/240	0,35	0,41	47,92	56,53	0,971	0,454
P_60/45/240	0,14	0,18	26,11	33,52		
R2_60/45/240	0,25	0,29	47,04	53,15	0,801	0,586

Tabla A.6.2. Variación en la resistencia por efecto de la escala.

Nomenclatura	N (7)	N (28)	Refuerzo patrón
R2_60/60/240	-0,040	-0,118	R2_40/40/160
R2_45/60/160	0,149	-0,053	R2_30/40/160
R2_60/45/160	0,457	-0,089	R2_40/30/160

Tabla A.6.2. Variación en la resistencia con respecto a probetas reforzadas de secciones cuadradas.

Refuerzo comparado	N (7)	N (28)	Refuerzo patrón
R2_30/40/160	-0,228	-0,062	R2_40/40/160
R2_40/30/160	-0,830	-0,142	
R2_45/60/160	-0,076	0,007	R2_60/60/240
R2_60/45/160	-0,497	-0,403	

Tabla A.6.4. Variación de resistencia entre secciones de área equivalente.

N	R2_30/40/160	R2_45/60/160
N (7)	0,292	0,019
N (28)	0,023	0,064
Refuerzo patrón	R2_40/30/160	R2_60/45/240

Tabla A.6.5. Resultados ensayos de compresión (Fuente: Elaboración propia)

Nomenclatura	Carga máxima de (ton) a 7 días.	Carga máxima (ton) a 28 días.	Resistencia máxima (kgf/cm ²) a 7 días.	Resistencia máxima (kgf/cm ²) a 28 días.	Valor Normalizado a su patrón de 7 días	Valor Normalizado a su patrón de 8 días
P_40/40/160	0,942	5,606	58,844	350,375	-0,040	-0,583
R2_40/40/160	0,904	2,340	56,484	146,219		
P_30/40/160	0,672	3,567	55,958	297,208	0,093	-0,533
R2_30/40/160	0,734	1,667	61,146	138,875		
P_40/30/160	0,813	4,287	50,781	267,938	-0,223	-0,307
R2_40/30/160	0,631	2,969	39,441	185,563		
P_60/60/240	4,925	15,128	68,403	210,104	-0,087	-0,432
R2_60/60/240	4,495	8,585	62,431	119,236		
P_45/60/240	2,270	6,878	42,037	127,361	0,087	-0,402
R2_45/60/160	2,468	4,113	45,694	76,157		
P_60/45/240	5,515	16,455	76,597	228,542	0,276	-0,282
R2_60/45/160	7,038	11,808	97,743	163,993		

Equipos



Figura A.6.1.35. Controls, Model 65 – L11G2/C.



Figura A.6.1.36. Controls, Model Q0802/B.



Figura A.6.1.37: Controls Model 65-L0005.