



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ALTAS TEMPERATURAS EN LA
RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE UN HORMIGÓN
POLIMÉRICO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de INGENIERO CIVIL

AUTOR: JEFFERSON DANIEL TOSCANO REVELO
TUTORA: DORIS ALEXANDRA ANDRADE SANDOVAL

Quito - Ecuador
2021

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jefferson Daniel Toscano Revelo con documento de identificación N° 1725873093 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 13 de diciembre del 2021

Atentamente,



Jefferson Daniel Toscano Revelo

1725873093

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Jefferson Daniel Toscano Revelo con documento de identificación N° 1725873093, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Evaluación del efecto de altas temperaturas en la resistencia a compresión y flexión de un hormigón polimérico”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de diciembre de 2021

Atentamente,



Jefferson Daniel Toscano Revelo

1725873093

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Doris Alexandra Andrade Sandoval con documento de identificación N° 1720110657, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ALTAS TEMPERATURAS EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE UN HORMIGÓN POLIMÉRICO, realizado por Jefferson Daniel Toscano Revelo con documento de identificación N° 1725873093, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de diciembre del 2021

Atentamente,



Arq. Doris Alexandra Andrade Sandoval, Msc

1720110657

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ALTAS TEMPERATURAS EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE UN HORMIGÓN POLIMÉRICO

EVALUATION OF THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE COMPRESSIVE AND FLEXURAL STRENGTH OF POLYMER CONCRETE

Jefferson Toscano - Revelo¹, Doris Andrade – Sandoval²

Resumen

Este documento presenta resultados experimentales del efecto de la temperatura en las resistencias a compresión y flexión de un hormigón polimérico, utilizando una resina de poliéster. Para el diseño del hormigón polimérico se tomó como referencia el método de la Densidad Óptima, permitiendo que los vacíos sean ocupados en su totalidad por los agregados pétreos originarios de la cantera de Pifo y en tanto que la resina de poliéster sirvió como ligante para unión de los mismos. Las probetas luego de su curado al ambiente durante 7 días, fueron expuestas en un horno a gas durante 30 minutos y 1 hora, con un aumento constante de 4°C/min hasta alcanzar 100°C, 150°C, 200°C y 250°C. Después de ser ensayadas se observa que la resistencia a compresión y flexión están afectadas directamente por la temperatura y el tiempo de exposición, viéndose perjudicadas a temperaturas mayores a 200°C; para los ensayos a compresión se obtuvo un valor máximo de 84 MPa, en tanto que para las probetas a flexión se consiguió una resistencia máxima de 27 MPa.

Palabras Clave: Hormigón, resina, polímero, exposición, temperatura

Abstract

This paper presents experimental results of the effect of temperature on the compressive and flexural strengths of a polymer concrete, using a polyester resin. For the design of the polymer concrete, the Optimum Density method was used as a reference, allowing the voids to be completely filled by the stone aggregates from the Pifo quarry, while the polyester resin served as a binder to bind them together. The specimens, after curing in the environment for 7 days, were exposed in a gas oven for 30 minutes and 1 hour, with a constant increase of 4°C/min until they reached 100°C, 150°C, 200°C and 250°C. After being tested, it is observed that the compressive and flexural strength are directly affected by temperature and exposure time, being impaired at temperatures higher than 200°C; for the compression tests a maximum value of 84 MPa was obtained, while for the flexural specimens a maximum strength of 27 MPa was achieved.

Keywords: Concrete, resin, polymer exposure, temperature

¹ Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador
Autor para correspondencia ✉: jtoscanor1@est.ups.edu.ec

² Docente Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador
Autor para correspondencia ✉: dandrades@ups.edu.ec

1.Introducción

Gracias a su alta resistencia, durabilidad, comportamiento frente al fuego, y otras propiedades mecánicas, el hormigón es considerado el material más usado en el ámbito de la construcción. Se encuentra presente en varios elementos estructurales de suma importancia, últimamente se ha buscado reducir las dimensiones de estos con la finalidad de generar estructuras más livianas. Por lo tanto, existe la tendencia de buscar nuevos materiales a fin de disminuir la carga muerta, también alcanzar resistencias altas en cortos períodos de tiempo sin ocasionar una pérdida en las propiedades mecánicas del elemento estructural [1].

Reda Taha define al hormigón polimérico como un tipo de hormigón en el cual los agregados y resinas poliméricas se mezclan para formar un material compuesto de alta resistencia, estanqueidad y durabilidad comparado con el hormigón convencional de cemento Pórtland. En el hormigón polimérico el material cementante puede ser sustituido por algunas resinas como es el caso de las epóxicas, vinílicas, de poliéster, de metilmetacrilato o sulfúricas que funcionarán como el ligante para los agregados finos y gruesos [2], [23].

Normalmente, los polímeros que se emplean en este tipo de hormigones son resinas termoestables ya que éstas, en presencia de catalizadores, se activan comenzando reacciones de polimerización por adición que, con el paso del tiempo, generarán una matriz plástica en las primeras horas y posteriormente rígida [3], [4].

Entre las ventajas de este material en cuanto a su desempeño mecánico, López destaca lo siguiente: el hormigón Polimérico es más ligero que el hormigón convencional, tiene un menor tiempo de fraguado, la resistencia a la compresión, flexión y tracción son superiores a las desarrolladas por el hormigón tradicional [5]; además es necesario mencionar que la misión del polímero es cubrir al menos la

superficie evitando contacto con el exterior; impidiendo el ingreso de agentes corrosivos [6].

El efecto que tiene la temperatura y el calor sobre el polímero está determinada por la temperatura de descomposición, la cual indica la degradación o destrucción del polímero debido a la combustión. Una vez que el hormigón ha sido afectado por el calor, tiende a presentar cambios microestructurales (matriz polimérica-áridos), lo cual altera el comportamiento físico – mecánico del mismo [7].

Por las razones citadas anteriormente se ha detectado la necesidad de profundizar el conocimiento sobre el desempeño de los hormigones poliméricos fabricados con materiales de nuestro país, la presente investigación específicamente se centra en evaluar el efecto de las altas temperaturas en las resistencias mecánicas de compresión y flexión en un hormigón polimérico con la finalidad de generar más experimentación y documentación que ayude a difundir el comportamiento de este material como una alternativa en el sector de la construcción.

2.Materiales y Métodos

Los materiales pétreos fueron adquiridos en la planta Holcim de agregados Pifo, ubicada al extremo nororiental de la ciudad de Quito; por otro lado, la resina de poliéster Ortoftálica POL® 3300 y sus catalizadores, fueron conseguidos en Pintulac.

En el presente artículo se expone la fabricación de probetas de hormigón polimérico formado por dos fases: la inorgánica comprendida por los agregados y la orgánica ocupada por la resina poliéster termoestable. Estas probetas fueron expuestas a diferentes temperaturas seleccionadas con base bibliográfica y experimental, para posteriormente, ensayar su resistencia a compresión y flexión.

2.1 Características de los materiales

2.1.1 Agregados

También denominados materiales granulares por el Instituto Ecuatoriano de Normalización, los agregados finos y gruesos ocupan gran parte del volumen del hormigón convencional de cemento Portland [1], por esta razón, es primordial que tengan buenas propiedades mecánicas a fin de asegurar un hormigón de calidad, con buena resistencia y durabilidad, por lo cual se le practican varios ensayos los cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos de caracterización de los agregados

Ensayo	Normativa
Granulometría	A. Grueso y A. fino NTE INEN 696
Gravedad específica (DRss, DAss)	A. fino NTE INEN 856 A. grueso NTE INEN 857
Densidad óptima de la mezcla	Universidad Central del Ecuador Determinación de la masa unitaria NTE INEN 858

2.1.2 Resina poliéster

La resina es una parte crucial de un hormigón polimérico ya que tiene la función de transferir los esfuerzos de los agregados y a la vez, ligarlos entre sí, para proveer protección frente a daños mecánicos y ambientales [26].

La resina de poliéster usualmente se presenta de una forma líquida viscosa y que con la adición de productos químicos pasa a un estado sólido; comportándose de esta manera como un material ligante entre los materiales pétreos. El hormigón polimérico es un material compuesto, el cual contiene dos fases, la continua u orgánica (resina poliéster) y la dispersa o inorgánica (agregados).

Las propiedades de la resina utilizada para esta experimentación se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de la resina poliéster Ortoftálica POL® 3300.

Propiedad	Unidad	Valor Max	Valor Min
Viscosidad	cP @ 25°C	1500	2500
Sólidos	% nvm	68	72
Tiempo de gel	min @ 25°C	7	10
Pico exotérmico	min @ 25°C	15	25
Temperatura de máx exotermia	°C	130	150
Estabilidad	meses		6

2.1.3 Estireno monómero

El fin del estireno monómero es reducir la viscosidad que tiene la resina poliéster según sea la necesidad que se requiera. Este disolvente debe aplicarse antes de colocar los iniciadores y acelerantes, además según el fabricante se recomienda aplicar el estireno entre un 25% máximo en peso con relación a la resina [8].

Como se mencionó, se usa el estireno como disolvente para disminuir la viscosidad de la resina; no obstante, el exceso del mismo afecta las propiedades de la resina, se vuelve quebradizo, pierde resistencia a la intemperie, es sensible al calor, entre otras [9].

2.1.4 Mek Peróxido

El peróxido de Mek ($C_8H_{18}O_6$), también conocido como peróxido metil etil cetona, es un catalizador que establece el proceso de transformación de estado líquido a estado sólido denominado curado, este cambio no sucede al instante de ser mezclado con la resina, sino que tiene un tiempo prudente (30 a 40 minutos), además viene acompañado de una reacción exotérmica [10]. Según datos proporcionados por el fabricante, el porcentaje del iniciador en relación con el peso es de 10cc a 25cc por cada kilo de resina poliéster [11].

2.1.5 Octoato de cobalto

Necesariamente se requiere el uso del acelerante, el cual permite que haya el fraguado o proceso de reticulación a

temperatura ambiente; este elemento proporciona el color rosa [3], característico de la resina y se lo añade en pocas cantidades, entre 1cc y 3cc por cada kilo de resina poliéster [11].

2.1.6 Consideraciones de los materiales

Los agregados pétreos deben estar secos para ser utilizados en el hormigón polimérico, ya que de lo contrario se disminuiría la adherencia entre éstos y la matriz de resina, generando una reducción en la resistencia [4].

Se debe evitar temperaturas ambientales altas, ya que aceleran el fraguado y como consecuencia proveen un menor tiempo para amasar los materiales.

2.2 Diseño de hormigón polimérico

Se decidió realizar el diseño del presente hormigón polimérico mediante el método de Densidad Óptima desarrollado por la Universidad Central del Ecuador.

Con el fin de conseguir mejores resultados con el hormigón polimérico, se requiere establecer buenas propiedades de los agregados pétreos, por esta razón fue necesario tener una buena gradación de los mismos, no contener materia orgánica y conocer las propiedades mecánicas, ya que los resultados de los ensayos de gravedad específica suelta y compacta, son necesarios para aplicar este método.

El diseño del hormigón polimérico por este método busca determinar la mayor densidad de la mezcla combinando el agregado grueso con el agregado fino, a fin de que éste pueda ocupar la mayor cantidad de vacíos que deja el agregado grueso, para esto se parte de una cantidad fija de ripio y se añade diferentes porcentajes de arena, se mezcla los agregados y se llena en un recipiente al ras compactándolo en tres capas. Cada proceso se lo realizó en cuatro ocasiones para establecer un valor promedio y conocer el punto máximo de la densidad; posteriormente en una gráfica “Densidad aparente vs Porcentaje de Agregados” y se

recorre del 2% al 5% en el eje de los agregados para establecer la Densidad Óptima de la mezcla [12].

2.3 Ensayos de resistencia

Dado que este material compuesto no posee aún normativa específica para la determinación de sus propiedades mecánicas, se han tomado como referencia las normas ASTM C39 para resistencia a compresión y ASTM C293 para resistencia a flexión utilizado una viga simple con carga en el punto central. Para el ensayo a compresión se utilizó una prensa eléctrica con carga constante de 45 kN/min hasta que ocurriese la falla en los cilindros. El ensayo a flexión fue realizado en una prensa eléctrica con carga constante de 24 kN/min en el punto central de la viga con luz libre de 225 mm [6].

2.4 Elaboración de probetas

Con la finalidad de promover una correcta adherencia entre la matriz de resina de poliéster y el material pétreo, fue necesario que los agregados se expusieran a un secado al horno a 110°C por 24 horas para eliminar la humedad.

Respecto a la preparación de la resina poliéster, ésta fue mezclada durante 3 minutos con su diluyente (estireno monómero) y se dejó reposar hasta que las burbujas de aire, producidas por el movimiento mecánico, se eliminaran en la medida de lo posible; adicionalmente se colocó el octoato de cobalto, el mismo que brinda un color rosa a la resina y por último se complementó con el Meck Peróxido mezclándolo durante otros 3 minutos. Posteriormente esta preparación fue mezclada con los agregados pétreos en las cantidades obtenidas por el método de la Densidad Óptima.

La mezcla final se la colocó en los moldes en 2 capas para los cilindros y en 2 capas para las vigas, cada capa fue compactada mediante una varilla y posteriormente vibrada [13]. El tiempo de desencofrado variaba según la

temperatura ambiente, pero se establece en un período de 2 a 4 horas.

Las dimensiones de las probetas para el ensayo a compresión fueron 70 mm de diámetro y 150 mm de altura; en tanto que a los especímenes para el ensayo a flexión las dimensiones fueron 50 mm x 50 mm x 305 mm. [6]. Todas las probetas fueron curadas a temperatura ambiente por 7 días, ya que, según la bibliografía, es el tiempo suficiente para que este hormigón desarrolle sus características mecánicas [14], luego de este periodo fueron expuestas a las temperaturas seleccionadas.

2.5 Exposición a Temperatura

Para la exposición se consideraron las siguientes condiciones experimentales: 3 probetas cilíndricas y 3 prismáticas fueron expuestas por 30 minutos y por 1 hora, respectivamente, a las diferentes temperaturas descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Temperaturas.

Tiempo	Temperaturas °C			
	100	150	200	250
30 min	3	3	3	3
1 hora	3	3	3	3

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis granulométrico

3.1.1 Análisis granulométrico del agregado grueso

Es necesario que los agregados sean bien gradados para que la mezcla del concreto tenga mayor manejabilidad y que existan menos espacios vacíos [15], para lo cual se utilizó como base la norma NTE INEN 696:2011; obteniendo como tamaño máximo nominal (TMN) 12,5 mm, tamaño máximo 19 mm, un módulo de finura de 2,94 cumpliendo con los límites de la faja granulométrica representado en la Figura 1.

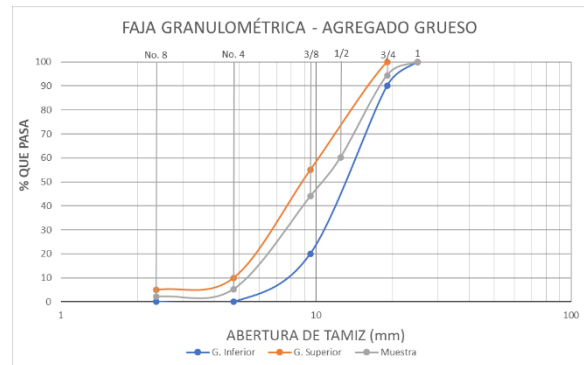


Figura 1. Curva granulométrica agregado grueso.

3.1.2 Análisis granulométrico del agregado fino

Una vez realizado el ensayo granulométrico conforme lo estipula la norma NTE INEN 696:2011, en la Figura 2, se puede observar que la mayoría de la curva está dentro de la faja granulométrica, sin embargo, el material más fino que 0,075mm tiene un 13% con respecto a su masa total, ocasionando el incumplimiento con lo recomendado en la normativa NTE INEN 872, determinando que el material contiene más árido fino [15]; a pesar de esto, se dispuso el agregado proveniente de la cantera de Pifo ya que en este tipo de hormigón se lo diseñó por el método de la Densidad Óptima.

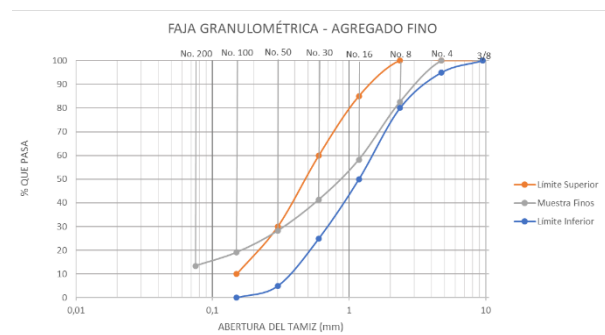


Figura 2. Curva granulométrica agregado fino

3.2 Densidad, peso específico (densidad relativa) para árido fino, árido grueso (SSS)

Se realizó este ensayo siguiendo la norma INEN 856:2010 para árido fino y la norma INEN 857:2010 para árido grueso. Este ensayo nos permite conocer la cantidad de masa por unidad de volumen en condición saturada con superficie seca (SSS) y el

volumen de poros que poseen; cuanto más porosa la mezcla de agregados el hormigón posee menos resistencia mecánica [15]. En la Tabla 4 se evidencia los resultados que se obtuvieron en los dos agregados.

Tabla 4. Pesos específicos de los agregados.

Tipo de Agregado	Peso específico (kg/m ³)
Agregado Grueso	2506,25
Agregado Fino	2512,56

3.3 Densidad Óptima

Este método, más conocido como “Ensayo de masa unitaria óptima de los agregados” realizado en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Central del Ecuador, es un procedimiento alternativo y con buenos resultados para la elaboración de un hormigón convencional de cemento Portland [16].

El desarrollo consiste en determinar la máxima densidad de la mezcla entre agregado grueso y fino, partiendo con el 100% de agregado grueso y luego aumentando un 10% de arena; para cada caso se determinará la densidad así hasta establecer su resultado máximo; esto se lo hace para que las partículas más pequeñas ocupen los vacíos que dejan las partículas grandes [17]. Según Gómez para obtener la densidad óptima se disminuye un 4% de agregado fino y se complementa aumentando un 4% al agregado grueso [18], sin embargo se optó por no reducir el agregado fino ya que se necesita este material para cubrir la mayor cantidad de vacíos, pues no se ocupa el cemento tipo Portland en el hormigón polimérico; por el contrario se aumentó en un 5% el agregado fino siguiendo el estudio de Buenaño [1].

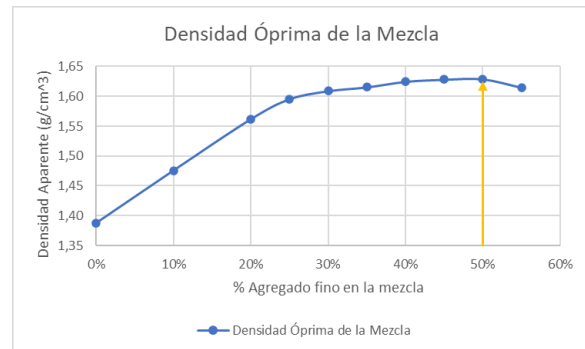


Figura 3. Máxima densidad de la mezcla de los agregados

En la Tabla 5 se muestran los resultados del ensayo de densidad óptima.

Tabla 5. Resultados de ensayo de Densidad óptima.

Tipo de Agregado	Cantidad	Unidad
Agregado Grueso (%AR)	45	%
Agregado Fino (%AA)	55	%
Densidad Óptima	1.615	kg/m ³

3.4 Diseño del hormigón polimérico mediante el método de masa unitaria óptima de los agregados, “Densidad Óptima”.

Para el diseño del hormigón polimérico mediante este método se hace uso de los resultados obtenidos en la Tabla 4 y Tabla 5, como también se establece una relación agua cemento de 0.65 y una densidad real del cemento 2,90 gr/cm³ para un concreto f’c=21 Mpa. Una vez encontrados los pesos específicos del agregado fino, agregado grueso y del cemento, este último se sustituye por un porcentaje de agregados (con el porcentaje de Densidad Óptima) y de resina poliéster según lo establece la bibliografía [1],[6].

En la Tabla 6 se puede observar la dosificación en peso para 4 probetas de hormigón polimérico.

Tabla 6. Cantidades para hormigón polimérico

Parámetro	Cantidad	Unidad
A. Grueso	2,46	kg
A. Fino	2,13	kg
Resina Poliéster	0,80	kg
Estireno Monómero (170 cc por cada kilo de resina)	0,14	kg
Meck Peróxido (15 cc por cada kilo de resina)	0,0119	kg
Cobalto (1,5 cc por cada kilo de resina)	0,00119	kg

3.5 Exposición a temperatura.

Después de los 7 días de curado al ambiente, los especímenes de hormigón polimérico se situaron en un horno a gas.

La temperatura en el horno se elevaba gradualmente a 4°C/min hasta llegar a la temperatura de ensayo, a continuación, se expusieron las probetas a los períodos de tiempos establecidos, al cabo de ello, las probetas eran retiradas del horno y se dejaban 24 horas para permitir que alcanzaran temperatura ambiente.

En la Tabla 7 se muestra en promedio la pérdida del peso de las probetas en base a los distintos intervalos de tiempos con exposición a los rangos de temperatura.

Tabla 7. Pérdida de peso de las probetas.

	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	Unidad
1 hora	0,01	0,27	1,22	2,08	%
30 min	0,00	0,15	0,64	1,60	%

En comparación el hormigón polimérico (HP) con la pérdida de masa del hormigón convencional de cemento Portland (HCP), existe una gran diferencia ya que el HP obtiene una pérdida de masa de 0.27% hasta los 150°C, en tanto que para un HCP a la misma temperatura obtiene una pérdida del 4% [19]. Este comportamiento concuerda con los resultados reportados por Sanaei *et al.*, que en un HP expuesto hasta los 150°C se manifiesta una pérdida del 0.4%, en tanto que un HCP,

en las mismas condiciones, obtiene mayor pérdida en masa [13].

3.6 Ensayos a compresión.

Aunque se conoce que la mayoría de las propiedades físico-mecánicas de las resinas poliméricas alcanzan su mejor desempeño a temperaturas por debajo de los 100°C [24], el objetivo del presente artículo es exponer un hormigón polimérico a un rango de temperaturas mayores para tener información sobre el comportamiento del mismo frente a este tipo de daño.

Elalaoui Oussama *et al.* establecen que la resistencia a la compresión depende del tipo de polímero y del fabricante [14], por lo que, en los resultados que se muestran en la Figura 4 representan un incremento de la resistencia a partir de los 100°C a 200°C semejantes a los resultados establecidos por Ataabadi *et al.*, en los que existe un incremento de la resistencia a la compresión desde la temperatura natural hasta los 150°C; a temperaturas superiores la resistencia decrece significativamente [13].

La máxima resistencia a compresión se obtuvo a los 200°C y fue de 84MPa con el tiempo de exposición de las probetas de 1 hora. En tanto, las probetas expuestas a 30 minutos, siguen el mismo patrón, pero con menor desarrollo de resistencia; estos resultados son congruentes con lo detallado por De la Caba *et al.*, en su artículo donde describieron la cinética de la reacción de la resina de poliéster a diferentes temperaturas. Encontraron que, en una primera etapa alrededor de un 20% de la resina se gelifica. Esto significa que la densidad de reticulación del polímero no es lo suficientemente alta como para inducir la formación de enlaces fuertes del tipo C=C. En cambio, en fases tardías de exposición a temperatura, los monómeros de estireno se encargan de promover la formación de estos enlaces fuertes del tipo C=C. Esto trae como

consecuencia que la matriz polimérica presente una estructura reticular con más enlaces intermoleculares fuertes. A pesar de que, en la investigación realizada por el equipo de De la Caba se utilizaron temperaturas mucho más bajas que las empleadas en el presente trabajo, la conclusión a la que llegaron sirve para explicar por qué a mayor tiempo de exposición de las probetas a altas temperaturas aumenta la resistencia, pues ellos demostraron que esta diferencia en la generación de enlaces en la matriz de la resina dependía del proceso de gelificación y del tiempo; ya que en los primeros 50 minutos de exposición el grado de gelificación era muy bajo, mientras que pasado este tiempo la gelificación de la matriz polimérica aumentaba y con ello también aumentó la presencia de enlaces de mayor fuerza [24], [25].

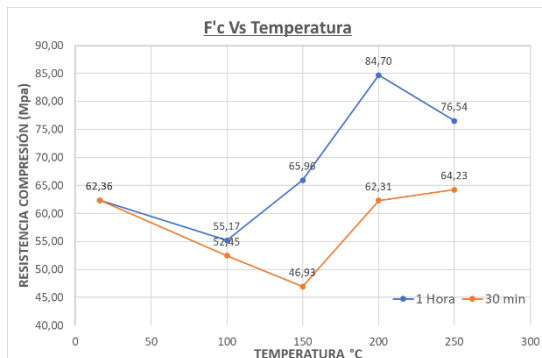


Figura 4. Resistencia a la compresión Vs. temperatura

3.7 Ensayos a Flexión.

Para determinar el módulo de rotura de las vigas rectangulares se fundamentó en la norma ASTM C293; en el cual se le coloca una carga en el punto central de la luz de la viga que se encuentra simplemente apoyada. En la figura 5 se muestra la resistencia a la tracción indirecta y de la misma manera se aprecia, un incremento de la resistencia hasta los 150°C teniendo un valor de 27 MPa conforme lo establecido en la bibliografía.

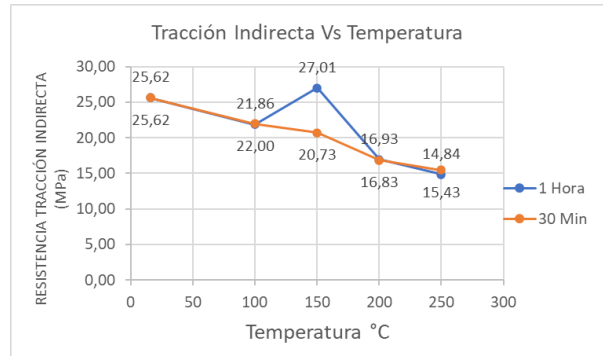


Figura 5. Resistencia a la tracción indirecta Vs. Temperatura

3.8 Correlación entre la resistencia a compresión y el módulo de rotura.

Varias investigaciones han concluido que existe una relación de un 10% y 20% entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión de un hormigón de cemento Pórtland [20].

Por esta razón se realiza una comparación entre la correlación del hormigón polimérico con la de cemento tipo Pórtland, a fin de establecer si mantiene la misma tendencia; para lo cual se hizo uso de la fórmula establecida en el ACI 318 [21].

$$f_r = 0,62\lambda(f'c)^{1/2}$$

Dónde:

f_r = Módulo de rotura estimado (Mpa).

$F'c$ = Resistencia a la compresión del concreto (Mpa).

λ = Factor de modificación.

Se usó una $\lambda = 1$ haciendo referencia al concreto de peso normal.

En los resultados que se presentan en las tablas 8 y 9, además en las figuras 6 y 7 se puede observar que existe un grado de correlación aceptable hasta temperaturas de 150 °C, en tanto que, superado dicha temperatura, la correlación es casi nula.

Tabla 8. Comparación de módulos de rotura obtenidos y teóricos de probetas expuestas a 1 hora y 30 min desde temperatura ambiente hasta 150°C

Tiempo	Temp. °C	F'c (Mpa)	MR Experi (Mpa)	MR Teórico (MPa)	% MR Experi con respecto f'c
1 hora	16	62,36	25,62	25,37	41,09
	100	55,17	21,86	22,95	39,61
	150	65,96	27,01	26,56	40,95
30 min	16	62,36	25,62	25,37	41,09
	100	52,45	22,00	22,02	41,94
	150	46,93	20,73	20,11	44,16

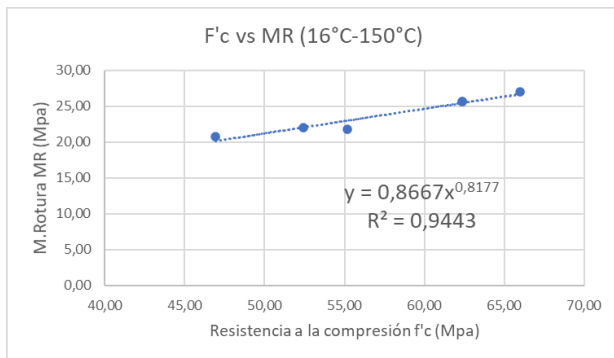


Figura 6. F'c vs Mr de 16°C a 150°C (1 hora y 30 minutos)

Tabla 9. Comparación de módulos de rotura obtenidos y teóricos de probetas expuestas a 1 hora y 30 min desde temperatura 200°C hasta 250°C.

Tiempo	Temp. °C	F'c (Mpa)	MR Experi (Mpa)	MR Teórico (MPa)	% MR Experi con respecto f'c
1 hora	200	84,70	16,93	16,04	19,99
	250	76,54	14,84	16,00	19,39
30 min	200	62,31	16,83	15,93	27,01
	250	64,23	15,43	15,94	24,02

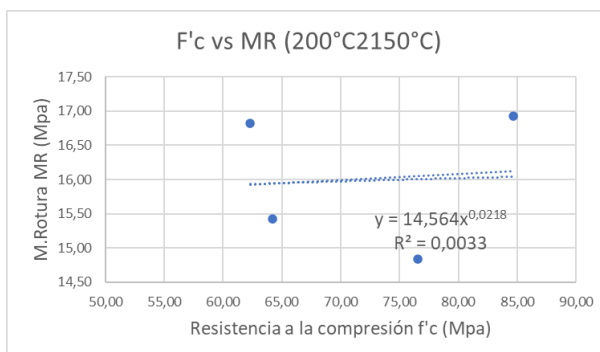


Figura 7. F'c vs Mr de 200°C a 250°C (1 hora y 30 minutos)

Fatemeh Heidarneshad et al. explican que para un hormigón polimérico, la ecuación con un buena correlación entre

el MR y la resistencia a la compresión tiene un factor de modificación de 0,8 y en tanto que el exponente al cual está elevado la f'c es de 2/3 [22], concluyendo que los resultados obtenidos son válidos.

4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo a la presente investigación, se puede concluir que las propiedades mecánicas de resistencia a compresión y flexión de un hormigón polimérico están influenciadas por la temperatura y tiempo de exposición. En términos generales, se establece que dichas propiedades se ven perjudicadas cuando la temperatura supera los 200°C.

A pesar que el diseño del hormigón polimérico fue de 21 MPa y que al sufrir una reducción en las resistencias a compresión después de ser expuesto a las distintas temperaturas, se pudo comprobar que estas superan los 55 MPa, logrando obtener hormigones de alta resistencia (> 42 MPa) al añadir el polímero.

Igualmente se logra un incremento importante en la resistencia a la tracción, comparado con el hormigón convencional, alcanzando valores que superan los 21 MPa en las condiciones más desfavorables de temperatura.

La relación entre el módulo de rotura (MR) y la resistencia a la compresión (f'c) presenta una buena correlación desde los 16°C hasta los 150°C (0,944), además su función potencial es semejante a la estipulada por la normativa ACI; pero superado esta temperatura existe una mala correlación.

En base a la experimentación, la resina tiene un elemento inflamable y de fácil combustibilidad; por lo que el hormigón polimérico puede ser aplicado en pavimentos, bordillos, revestimientos de canales, conductos, cimentaciones, pilotes aprovechando sus resultados de las resistencias a compresión y a flexión.

En cuanto a la comparación de precios por m³ con un hormigón de

cemento Pórtland; el hormigón polimérico emplea el mismo equipo, maquinaria y mano de obra, sin embargo, duplica su valor en cuanto a los materiales, ya que el valor de la resina y sus elementos tienen un alto costo.

Por lo anterior, se recomienda evaluar las bondades del hormigón polimérico frente al hormigón convencional de cemento Pórtland en términos de resistencia en el rango de temperaturas convencionales de trabajo y la protección que pueda brindar al acero ante agentes externos.

Para profundizar el conocimiento al respecto se recomienda una evaluación de la exposición a temperaturas con rangos entre, temperatura ambiente y 150°C ya que presenta una variación interesante de la resistencia, tanto a compresión como a flexión. Además, se recomienda utilizar las mismas materias primas en la fabricación de las probetas, eso no fue posible en este trabajo dado que hubo un cambio del proveedor que surtía la resina, esto pudo haber influido en los resultados obtenidos.

Por cuestiones experimentales, algunas probetas fueron expuestas a temperaturas mayores de 350°C, estos especímenes se inflamaban en el horno debido al bajo punto de inflamación del estireno. Como consecuencia, al volatilizarse esta sustancia se perdía parte de la matriz ligante del hormigón polimérico lo que culminaba en la segregación de los agregados pétreos, razón por la cual estas probetas no fueron consideradas para los ensayos mecánicos, sin embargo, ayudaron a determinar el límite máximo de temperaturas de exposición a ser utilizado en esta investigación.

También se sugiere que la exposición a altas temperaturas se lo lleve a cabo en un lugar abierto y con suficiente ventilación, hacer uso de máscara de seguridad para gases y vapores, así como de gafas de protección, debido a la liberación de humo.

Referencias

- [1] C. D. P. M. BUENAÑO, *Determinación de un porcentaje de resina de poliéster en un concreto polimérico para alcanzar una alta resistencia a compresión*. 2018.
- [2] R. Morales Ibarra, E. Duncan Flores, S. García Montes, A. Martínez Arellano, J. Barrón Granados, y D. Cepeda Mújica, «Uso de materiales compuestos reciclados de fibra de vidrio-poliéster como cargas en concreto polimérico», *Ingenierías*, vol. 16, n.º 61, pp. 48-53, 2013.
- [3] A. Aguado (E.J.S. Ingenieros de Caminos Canales) y J. M. Salla (E.T.S. Ingenieros Industriales), «Los hormigones con polímeros en la construcción», *Inf. la Construcción*, vol. 39, p. 12, 1987.
- [4] A. E. F. Arévalo y K. L. J. G. Sánchez, «Desarrollar un concreto de origen polimérico adaptado a la industria de la construcción nacional», 2016.
- [5] I. Q. M. M. LÓPEZ, «Elaboración y caracterización de concreto polimérico: efecto del contenido de fibra de luffa y de la radiación gamma», *Univ. AUTÓNOMA DEL ESTADO MÉXICO*, vol. 66, pp. 37-39, 2012.
- [6] N. A. A. SEBASTIAN y V. A. D. JOEL, «Elaboración de un hormigón polimérico aprovechando residuos de la trituración de placas

- electrónicas», 2021.
- [7] L. Barragán, B., Di Maio, A., Giaccio, G., Traversal y R. Zerbino, «Hormigones elaborados con distintos tipos de agregado expuestos a altas temperaturas», pp. 27-41, 1999.
- [8] H. M. FERNÁNDEZ, «Resinas poliéster insaturadas», vol. 5, pp. 3-6, 1997.
- [9] I. químicas del sur S.A, «Instructivo para el uso y aplicación de resina poliéster», *Ind. Químicas del Sur S.A.*
- [10] A. Gil, «Resinas de poliéster Guía de manejo», p. 14, 2012.
- [11] R. D. E. Uso, «Pol@ 33000 Resina poliéster Ortoftálica de propósito general», n.º 1, pp. 0-2, 2015.
- [12] C. M. T. Marisol y T. N. A. Gabriela, «Correlación del Módulo de Rotura del hormigón simple en vigas elaboradas con agregados pétreos naturales y agregados reciclados», 2018.
- [13] H. Sanaei Atabadi, A. Zare, H. Rahmani, A. Sedaghatdoost, y E. Mirzaei, «Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation», *J. Build. Eng.*, vol. 34, n.º October 2020, p. 101878, 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.101878.
- [14] O. Elalaoui, E. Ghorbel, V. Mignot, y M. Ben Ouezdou, «Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250 °c», *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, n.º 1, pp. 415-424, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.027.
- [15] P. D. F. QUINTANA y S. A. A. ALMEIDA, «Manual de laboratorio de ensayo de materiales para la construcción», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, 2019.
- [16] W. A. D. Almeida, «Análisis comparativo de métodos de diseño de mezclas de un hormigón de alta resistencia conformado por agregados procedentes de la cantera de Pintag», 2019.
- [17] D. Bermudez y H. Cadena, «Correlación Entre La Resistencia Al Esfuerzo De Compresión Y Tracción Del Hormigón, Utilizando Agregados De Las Canteras De Pifo Y San Antonio, Cemento Holcim Tipo Gu», pp. 1-237, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4413/1/T-UCE-0011-163.pdf>.
- [18] A. J. S. Gómez, «Determinación del módulo de rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera san roque para $f'c = 21$ MPa», pp. 1-188, 2014.
- [19] J. González Gil, «Análisis de la variación de propiedades termo

- físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura», pp. 48-95, 2019.
- [20] G. A. L. Rivera, «Tecnología del concreto y Mortero. Concreto Simple», *Univ. del Cauca*, p. 256, 2013, [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/13569512/CONCRETO_SIMPLE.
- [21] J. P. BRAÑEZ CORO, «Determinación De La Correlación Entre El Módulo De Rotura Y La Resistencia a La Compresión Del Concreto», *Cienc. Sur*, vol. 4, pp. 1-6, 2018, [En línea]. Disponible en: https://biblioteca.bucaramanga.upb.edu.co/docs/digital_19688.pdf.
- [22] F. Heidarneshad, K. Jafari, y T. Ozbakkaloglu, «Effect of polymer content and temperature on mechanical properties of lightweight polymer concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 119853, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119853.
- [23] M. G. Y. O. M.M. Reda Taha, *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, Segunda ed., vol. Cap. 17, Woodhead Publishing, 2019, pp. 391-408.
- [24] E. & B. S. Ates, "The effect of elevated temperature curing treatment on the compression strength of composites with polyester resin matrix and quartz filler," *Materials & Design*, pp. 435-443, 2012.
- [25] K. G. P. E. A. & M. I. De la Caba, "Kinetic and rheological studies of two unsaturated polyester resins cured at different temperatures.," *European Polymer Journal*, pp. 19-23, 1997.
- [26] M. C. Santos Ribeiro, C. M. Lopes Tavares, M. Figueiredo, A. J. Mendes Ferreira and A. A. Fernandes, "Bending characteristics of resin concretes," *Materials Research*, no. 6, Junio 2003