

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN CONCRETO POLIMÉRICO

**DIEGO FERNANDO CETINA
CRISTHIAN DAVID MACHUCA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN CONCRETO POLIMÉRICO

**DIEGO FERNANDO CETINA
CRISTHIAN DAVID MACHUCA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
Ingeniero civil Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizaje y sobre todo de felicidad.

Le doy gracias a mi madre Graciela Cetina por apoyarme en todo momento, por los valores que me ha inculcado, y por brindarme la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos porque son parte importante de mi vida y representar la unidad familiar. A todos ellos gracias por ser un ejemplo de vida y haberme alentado a seguir adelante cuando las cosas se tornaban difíciles.

A Jairo del laboratorio de materiales gracias por el apoyo y la ayuda brindada durante el desarrollo de este proyecto.

A mi director Oscar Javier Begambre Carrillo por la confianza que nos brindó y el apoyo intelectual durante el proyecto.

A mi compañero Cristhian por el compromiso durante el desarrollo del proyecto la amistad que forjamos y el apoyo brindado cuando se presentaron dificultades.

A todos y cada uno de mis amigos que hicieron de mi vida universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare.

Diego Fernando Cetina

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme permitido vivir hasta este día, haberme guiado a lo largo de mi vida, por ser mi apoyo, mi luz y mi camino. Por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.

Le doy gracias a mis papas Martha y Luis por todo el apoyo brindado a lo largo de mi vida. Por darme la oportunidad de estudiar esta carrera. Y por ser ejemplo de vida y por promover el desarrollo y la unión familiar en esta nuestra familia.

A mis hermanos Omar, Francy y Alba por apoyarme en aquellos momentos de necesidad, por ayudar a la unión familiar, Angelica por ser incondicional a lo largo de todo este proceso, por ser un ejemplo de persona, de estudio y de perseverancia, a todos ellos gracias por llenar mi vida de grandes momentos que hemos compartido.

A mi compañero Diego por su entrega y compromiso para con este proyecto, por ser un ejemplo de amistad, de trabajo y por recibir su apoyo incondicional en las diferentes situaciones de la vida.

A todos mis amigos, por las vivencias compartidas, porque de una u otra forma hicieron que este proceso se tornara de manera agradable, al profesor Rene a mis amigos de FUTSALA, de VHFC, y a todos aquellos con los que compartí gracias por la amistad brindada.

A mi director Oscar Javier Begambre Carrillo por la confianza que nos brindó y el apoyo intelectual durante el proyecto.

Cristhian David Machuca Duarte

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. METODOLOGÍA DE DISEÑO	18
1.1 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	18
1.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA MEZCLA	19
1.3 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PARA LA ELECCIÓN DE LA MEZCLA	20
1.4 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	20
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	22
2.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN	24
2.3 DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO	25
3. ENSAYOS MECÁNICOS DEL CP	26
3.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN	26
3.1.1 Resultados y discusión ensayo de compresión	28
3.2 RESISTENCIA A TENSIÓN (TENSIÓN INDIRECTA)	28
3.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD O MÓDULO DE YOUNG	30
3.3.1 Resultados y discusión ensayo módulo de elasticidad	30
3.4 ENSAYO DE ADHERENCIA ENTRE PARTÍCULAS O ENSAYO DE PULL- OUT	33
3.4.1 Resultados y discusión ensayo de adherencia	35
4. CONCLUSIONES	37
TRABAJOS CITADOS	39
BIBLIOGRAFIA	42

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Ensayos físicos de los agregados	19
Tabla 2. Variaciones propuestas	19
Tabla 3. Cantidad de materiales para 1 <i>m</i> ³ de concreto polimérico	25
Tabla 4. Resistencia a compresión	28
Tabla 5. Módulo de elasticidad	31
Tabla 6. Resistencia a la adherencia	35

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Pico exotérmico y tiempo de gel de la resina	22
Gráfico 2. Curva granulométrica de los agregados y sus límites	23
Gráfico 3. Resistencia a compresión probetas con $M_f/M_r=0.4$	23
Gráfico 4. Resistencia a la tensión probetas con 15 % de resina y $M_f/M_r=0.4$	30

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Montaje ensayo a compresión	26
Figura 2. Montaje ensayo a tensión indirecta	29
Figura 3. Falla espécimen	32
Figura 4. Montaje ensayo de adherencia	34
Figura 5. Probeta para ensayo de adherencia	35
Figura 6. Falla ensayo pull-out	35

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultados resistencia a compresión especímenes con relación de $M_f/M_r=0.3, 0.4$ Y 0.5	44
Anexo B. Resultado final de la resistencia a compresión	50
Anexo C. Resultados a la tensión (ensayo de tracción indirecta)	52
Anexo D. Módulo elástico por el método de la secante	54
Anexo E. Caracterización de los materiales	61
Anexo F. Gráficas de ensayos adherencia entre partículas (ensayo pull-out)	63

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN CONCRETO POLIMÉRICO*

AUTORES: Diego Fernando Cetina
Cristhian David Machuca**

PALABRAS CLAVES: resina, concreto polimérico, filler, resistencia compresión, tensión indirecta, módulo de elasticidad, pull-out,

DESCRIPCIÓN

En este artículo se presenta el diseño y los resultados obtenidos en el estudio de resistencia a compresión, tensión, módulo de elasticidad y adherencia entre partículas para un concreto polimérico (CP), compuesto por una resina poliéster ortoftálica pre-acelerada de nombre comercial CRISTALAN 856 como aglomerante; carbonato de calcio como filler; arena de río y triturado de la región como agregados. Para la dosificación de los materiales se propuso una relación de masa-filler/masa-resina (Mf/Mr), haciendo un analogía a la relación de Agua/ Cemento (A/C) del concreto de cemento portland. Se plantearon tres variaciones en el porcentaje de resina 12%, 15%, 18%, con lo que se determinó que la relación de Mf/Mr =0.4 y porcentaje de resina =15% es la combinación que muestra resultados favorables ante esfuerzos de compresión, bajo este parámetro, y para la combinación anterior, se obtuvieron resultados de resistencia a compresión de hasta 9800 (Psi) para un tiempo de curado de cinco días, siendo esta la resistencia máxima alcanzada. Seguidamente a este diseño de mezcla se le realizó el ensayo a tensión, que se determinó con la prueba brasileña o tensión indirecta, ensayo que nos arrojó una resistencia cerca al 10% de la resistencia a compresión, también se determinó el módulo de elasticidad por el método de la secante descrito en la NTC 4025, y por último se analizó la adherencia que tiene este tipo de concreto con otros materiales, en este caso con el acero de refuerzo, para este último ensayo se recurrió a la prueba del pull-out.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo

ABSTRACT

TITLE: MECHANICAL CHARACTERIZATION OF A POLYMER CONCRETE*

AUTORES: Diego Fernando Cetina
Cristhian David Machuca**

KEYWORDS: resin, polymer concrete, filler, compression resistance, indirect strain, modulus of elasticity, pull-out.

DESCRIPTION

This article discusses the design and the results obtained in the study of resistance to compression, tension, elastic modulus and adhesion between polymer particles for a particular (CP), comprising a pre-accelerated polyester orthophthalic resin tradename 856 occurs CRISTALAN as a binder; calcium carbonate as filler; river sand and crushed in the region as aggregates. For dosing of materials ratio mass-filler / resin-mass (M_f / M_r) was proposed, making an analogy to the ratio of water / cement (A / C) of portland cement concrete. Three variations were made in the 12% resin percentage, 15%, 18%, which was determined that the ratio $M_f / M_r = 0.4$ and a percentage of resin = 15% is the combination showing favorable results to compressive stresses under this parameter, and for the above combination, results of compressive strength of up to 9800 (Psi) for a curing time of five days is obtained, this being the maximum strength achieved. Then this mix design was underwent testing to voltage, which was determined with the Brazilian test or indirect tension test showed us strength near 10% of the compressive strength, the elastic modulus was also determined by the secant method described in ISO 4025, and finally the adhesion of this type of concrete with other materials are analyzed, in this case with steel reinforcement, the latter test was used to test the pull-out.

* Degree work.

** Faculty of Engineering physicomechanical. School of Civil Engineering. Director: Oscar Javier Carrillo Begambre

INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas se ha fortalecido la investigación y el uso del concreto polimérico (CP), el cual consiste básicamente en un tipo de resina y agregados minerales. La mezcla de estos materiales da como resultado un concreto claramente más resistente que el concreto tradicional, que aunque es un material versátil en cuanto a funcionalidad y economía, presenta algunas limitaciones tales como: baja resistencia de esfuerzos a flexión, tensión, y alta porosidad [1].

El uso del concreto polimérico (CP) en sus inicios, es decir en la década de 1950 era muy limitado, fue hasta 1970 que los materiales modificados con polímeros tuvieron una promoción significativa, tanto así que se da inicio al primer congreso internacional sobre polímeros en hormigón (ICPIC) el cual se celebrara en Londres en el año de 1975, más adelante se formaron comités y simposios para abordar el área de los polímeros en concretos, haciendo de estos materiales el futuro de la construcción [2].

En la actualidad los concretos poliméricos se usan en la construcción de pisos industriales, mesones para baños, tanques de almacenamiento y especialmente en el área de prefabricados, aun así sin dejar atrás las aplicaciones eléctricas como lo son de aisladores de alta tensión, soporte para aislamiento, entre otras [3]. La producción y disposición del concreto polimérico depende de los conocimientos empíricos de los obreros, por lo que este campo carece de procedimientos de diseño que faciliten su elaboración [1].

En consecuencia, con lo mencionado anteriormente, este estudio plantea una metodología de diseño de CP de forma experimental con lo que se espera poder identificar uno o varios parámetros que fundamenten el diseño de la mezcla, así

como en el concreto tradicional lo son la resistencia a la compresión y la relación agua cemento.

1. METODOLOGÍA DE DISEÑO

1.1 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales que componen el concreto polimérico que se expone en este estudio son: una mezcla de resina y filler que actúan como aglomerante. La resina empleada fue una poliéster ortoftálica pre-acelerada de referencia comercial CRISTALAN 856 adquirida en Ingequimica (comercialización y representación fibras-resinas-químicos), catalizada con peróxido de metil etil cetona (MEK) y el filler usado carbonato de calcio (CaCO_3), se usó una combinación de agregado fino y grueso, compuesto por arena de río y triturado del departamento de Santander.

Seguidamente a los materiales mencionados anteriormente se les realizó una serie de ensayos que permitieron conocer sus propiedades físicas y mecánicas. A la resina se le realizó ensayo de pico exotérmico y tiempo de gel según lo especificado en la norma ASTM-D2471, para este se depositaron 100 gr de resina catalizada al 2% en un molde a temperatura ambiente, se registraron valores de tiempo y temperatura como se observa en el **grafico 1**.

A los agregados se les realizó análisis granulométrico para agregados finos y gruesos de acuerdo a lo descrito en la Norma Técnica Colombiana (NTC 77) como se evidencia en el **grafico 2**. También ensayo de masa unitaria y los vacíos entre partículas de los agregados (NTC 92), método para determinar la densidad y absorción del agregado fino (NTC 237), método para determinar la densidad y absorción del agregado grueso (NTC 176), Método para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto (NTC 127), los resultados se resumen en la **tabla 1**.

Tabla 1. Ensayos físicos de los agregados

ENSAYO FISICOS DE LOS AGREGADOS					
GRAVEDADES ESPECIFICAS					
	A. FINO	A. GRUESO		A. FINO	A. GRUESO
REAL	2,67	2,76	PESO UNITARIO SUELTO	1425 kg/m ³	1410 kg/m ³
APARENTE	2,58	2,7	PESO UNITARIO COMPACTO	1565 kg/m ³	1530 kg/m ³
APARENTE SSS	2,66	2,72	ABSORCION%	2%	1%
			PORCENTAJE DE VACIO	36%	36%
MATERIA ORGANICA	FINO # 2		NORMAS	NTC 77 - 127 - 92 - 237	
MODULO DE FINURA	2,86				
TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	1				

Fuente: Elaboración propia

1.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA MEZCLA

Para determinar la dosificación de mezcla óptima que proporcione mayor resistencia a la compresión, se realizaron una serie de ensayos en donde se varía el porcentaje de resina y a su vez la relación masa-filler/mas-resina (Mf/Mr), de esta manera las combinaciones realizadas fueron las señaladas en la **tabla 2**.

Tabla 2. Variaciones propuestas

Mezcla	% de Resina	Relación (Mf7Mr)
PC-1203	12	0.3
PC-1204		0.4
PC-1205		0.5
PC-1503	15	0.3
PC-1504		0.4
PC-1505		0.5
PC-1803	18	0.3
PC-1804		0.4
PC-1805		0.5

Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes de resina están basados en rangos mencionados en estudios previos donde se enuncia un porcentaje de resina presente en la mezcla de entre 10% a 20% [4], con el fin de limitar el número de ensayos debido al elevado costo de la resina se propusieron variaciones de resina como se indica en la **tabla 2**. De la misma manera se establecieron variaciones en la relación masa-filler/masa-resina (Mf/Mr), el filler representa alrededor del 4% del volumen total de la mezcla. Habiendo definido lo anterior se calcula el porcentaje de agregados finos y gruesos respectivamente que estarán presentes en la mezcla, usando el método grafico propuesto por Diego Sánchez de Guzmán se obtuvieron los siguientes porcentajes de agregados: 60% agregado grueso y 40% agregado fino.

1.3 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PARA LA ELECCIÓN DE LA MEZCLA

Se realizaron las diferentes probetas con las variaciones mencionadas anteriormente, con el fin de determinar la resistencia a la compresión de cada una de las diferentes mezclas.

Para la elaboración de aquellas se utilizó un molde con un diámetro de 3in y una altura de 6in, se hicieron ensayos cada 24 horas durante cinco días con cada una de las variaciones definidas en la **tabla 2**, esto debido al rápido curado de este tipo de concreto. La consideración anterior obligo a la realización de 45 ensayos.

1.4 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron en el laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad Industrial de Santander, en la prensa hidráulica para ensayos a compresión de cilindros de concreto, como ya se mencionó estos se ejecutaron cada 24 ± 1 horas.

“Debido a que no existen ensayos estandarizados aplicables a probetas de concreto polimérico” [1], en este estudio se utilizaron normas NTC correspondientes a cada ensayo normalizado para concreto portland.

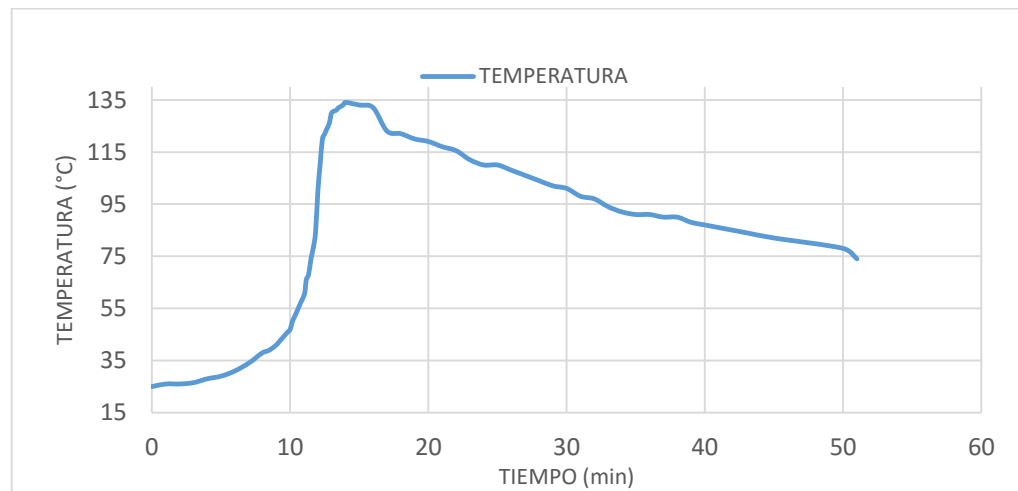
Para el ensayo de compresión se emplearon especímenes de diámetro 3in y altura 6in, los cuales fueron evaluados de acuerdo a la norma NTC 673.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En el **grafico 1** se muestra los resultados del ensayo de temperatura exotérmica y tiempo de gel para la resina, en ella se observa un tiempo de gel de aproximadamente 10 minutos y una temperatura máxima exotérmica de 134 °C.

Gráfico 1. Pico exotérmico y tiempo de gel de la resina

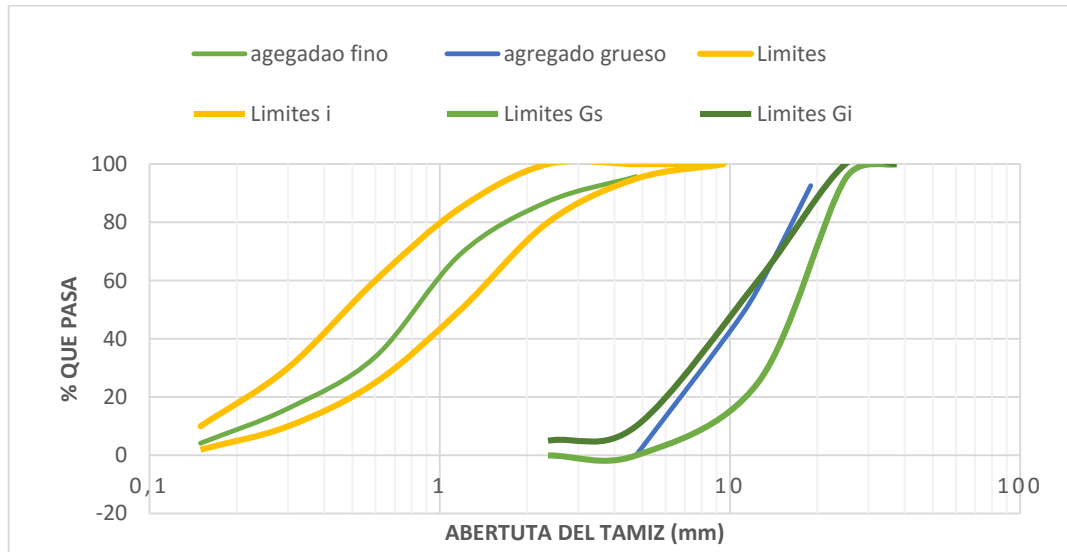


Fuente: Elaboración propia

Los agregados afectan directamente los diferentes factores de una mezcla, trabajabilidad, durabilidad, bombeabilidad, contracción, economía, entre otros que también influyen en la resistencia a los diferentes ensayos mecánicos, es por esto que se debe cumplir con las especificaciones descritas en la NTC-174-94. [5] En el **grafico 2** se aprecia la granulometría de los agregados fino y grueso que se emplearon en la confección de los especímenes a ensayar, teniendo confiabilidad al utilizar estos agregados ya que se encuentran entre los límites de gradación especificados en la norma mencionada.

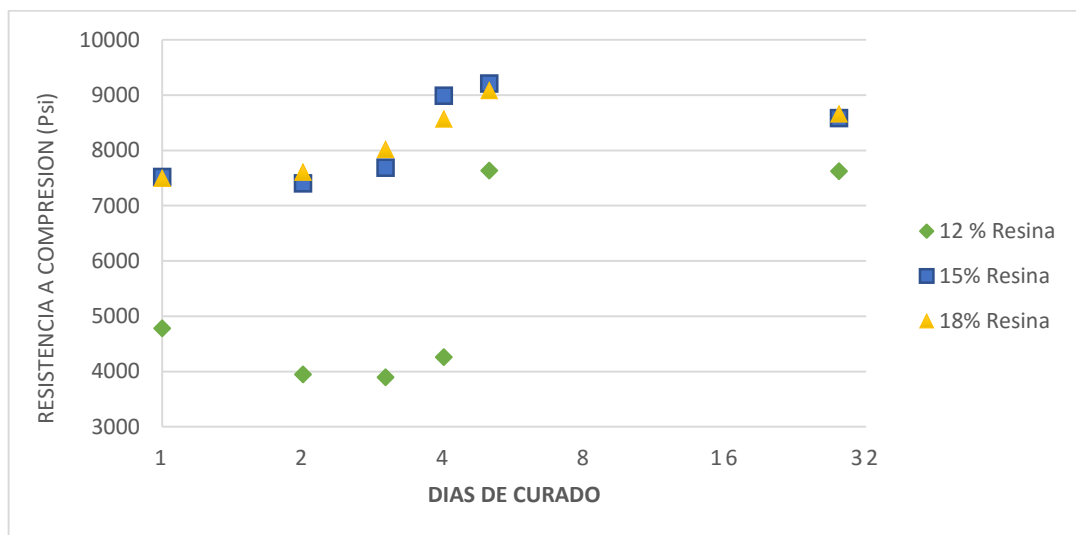
La **tabla 1** relaciona las propiedades obtenidas al realizar la caracterización de los agregados según las normas antes especificadas, en ella se observa que el agregado fino posee una densidad seca de 1565 kg/m^3 y el agregado grueso de 1530 kg/m^3 , un porcentaje de absorción de 2% y 1% respectivamente.

Gráfico 2. Curva granulométrica de los agregados y sus límites



Fuente. Elaboración propia

Gráfico 3. Resistencia a compresión probetas con $M_f/M_r=0.4$



Fuente: Elaboración propia

2.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

De las combinaciones de mezclas mencionadas en la **tabla 2** la que se consideró que presenta mejor resistencia a la compresión es 15% de resina, relación masa filler/masa resina de 0.4 con 60 % de agregado grueso y 40 % de agregado fino, los datos obtenidos de resistencia a compresión se relacionan en el **grafico 3**, se puede apreciar que con un 18% de resina presente en la mezcla se obtienen valores de resistencia muy similares a los de 15% de resina.

Igualmente del **grafico 3**, se puede inferir que a medida que pasa el tiempo de curado del concreto polimérico, de la misma manera que en el concreto tradicional, se evidencia el aumento progresivo de la resistencia a compresión. Uno de los fines de realizar estos ensayos es definir el tiempo que tarda el concreto polimérico (CP) en alcanzar su resistencia máxima, para ello se realizaron ensayos durante 5 días [6], sin embargo aún no se tiene certeza de que al quinto día se obtenga la máxima resistencia a la compresión, por lo que se elaboraron especímenes que se ensayaron a los 28 días dando como resultado que la resistencia entre el quinto y el veintiochoavo día no difieren en gran cantidad, por lo que es acertado decir que el concreto polimérico (CP) luego del quinto día ya ha alcanzado su resistencia máxima. El **grafico 3** muestra los valores de resistencia a compresión para una relación de ($M_f/M_r=0.4$), para las otras relaciones propuestas los resultados se pueden apreciar en el anexo A.

2.3 DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO

Tabla 3. Cantidad de materiales para 1 m³ de concreto polimérico

DISEÑO DE MEZCLA PARA UN m ³				
ASUMIMOS QUE 15% DE LA MEZCLA ES RESINA, Y PARA UNA RELACION DE MASA FILLER/MASA RESINA =0.4				
volumen total (m ³)	1.0	densidad de la resina (kg/m ³)	1140	Kg/m ³
Mf/Mr	0.4	densidad carbonato de calcio (kg/m ³)	2710	Kg/m ³
% resina	15.0	densidad del agregado grueso(kg/m ³)	1530	Kg/m ³
% filler	2.5	densidad agregado fino (kg/m ³)	1565	Kg/m ³
% agregados	82.5			
peso de la resina (kg)	340.4	vol de la resina(m ³)	0.150	(m ³)
peso del filler (kg)	57.3	vol del filler (m ³)	0.025	(m ³)
peso del agregado grueso(kg)	1122.9	Vol agregado grueso (m ³)	0.495	(m ³)
peso del agregado fino (kg)	748.6	volumen agregado fino (m ³)	0.330	(m ³)
		vol de los agregados (m ³)	0.825	(m ³)

Fuente: Elaboración propia

En la **tabla 3** se muestran las cantidades de los materiales para la fabricación de un metro cúbico de concreto polimérico. Habiendo así determinado el diseño de mezcla óptimo, se procede a realizar los ensayos mecánicos propuestos en este estudio.

3. ENSAYOS MECÁNICOS DEL CP

3.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La resistencia a compresión es uno de los parámetros más importantes en el diseño de mezcla para estructuras convencionales de concreto, es precisamente en esta parte donde se fundamenta el objetivo de este estudio el cual pretende analizar el comportamiento de la resistencia a compresión de un concreto polimérico, teniendo como referencia resultados obtenidos en otras investigaciones las cuales han arrojado valores de resistencia a compresión de 10000 Psi a 12000 Psi [1].

Figura 1. Montaje ensayo a compresión



Fuente: elaboración propia

La manera más sencilla de evaluar la resistencia del concreto a compresión es mediante un ensayo mecánico, el cual consiste en la aplicación de carga vertical en la cara circular del espécimen, el valor de resistencia se expresa en Mega pascales (MPa) o libras por pulgada cuadrada (Psi).

Los especímenes cilíndricos para ensayo de compresión, pueden ser de varios tamaños, con un mínimo de 50 mm de diámetro x 100 mm de longitud. En este caso tendrán dimensiones de 100 mm de diámetro x 200 mm de longitud aproximadamente. De acuerdo con lo establecido en la NTC- 673 [7].

En la **tabla 4** se resume los resultados de la resistencia a compresión para especímenes PCX-1504 a diferentes edades de curado, Verificando que se obtuvo la resistencia para la cual se diseñó la mezcla, la cual se obtuvo a partir de los ensayos preliminares con los que se determinó la dosificación de la mezcla.

Para la identificación de los especímenes se usó la siguiente nomenclatura PCX-1504: concreto polimérico con x días de curado, con 15 % de resina y relación masa filler/masa resina de 0.4, y T-PCX: testigo para concreto polimérico a x días de curado.

Los valores de resistencia a la compresión encontrados en este estudio como se observan en la **tabla 4**, oscilan entre 8400 Psi y 9800 Psi, de acuerdo a estudios ya realizados se podría obtener valores de resistencia de hasta 11000 Psi para concretos poliméricos con diferentes tipos de resina [8]- [1].

Las propiedades de resistencia se ven influenciadas por varios factores que tienden a interactuar unos con otros, los principales factores son la naturaleza de los materiales utilizados, los factores que controlan para la mezcla, proporciones, procesos de mezcla, métodos de curado y por supuesto el método de ensayo aplicado [9]- [7].

3.1.1 Resultados y discusión ensayo de compresión

Tabla 4. Resistencia a compresión

Espécimen	Tiempo	% Resina	Mf/Mr	Carga soportada (KN)	$f'c$ (Psi)	$f'c$ (MPa)
PC3-1504	Día 3	15	0.4	474.9	8496.00	58.58
T-PC3		15	0.4	481.7	8618.00	59.42
PC6-1504	Día 6	15	0.4	531	9500.00	65.50
T-PC6		15	0.4	537.8	9622.00	66.34
PC9-1504	Día 9	15	0.4	540.5	9670.00	66.67
T-PC9		15	0.4	547.1	9788.00	67.48

Fuente: Elaboración propia

Si clasificamos este concreto según su resistencia a compresión, se puede describir como un concreto de alta resistencia, puesto que los valores encontrados en este estudio están en el rango de 6000 a 14000 Psi [10]. El valor máximo de resistencia alcanzado en este estudio es de 9788 Psi en un tiempo de 9 días de curado a temperatura ambiente, según estudios se ha establecido que el concreto de cemento portland, alcanza el 20 % de su resistencia máxima alcanzada a los 28 días en un día [6], en contraste para el concreto polimérico se puede afirmar que para un día de curado a temperatura ambiente se alcanza más del 70% de su resistencia máxima.

3.2 RESISTENCIA A TENSIÓN (TENSIÓN INDIRECTA)

El concreto posee muy baja resistencia a tensión, esta representa alrededor del 10% de la resistencia a compresión, por lo tanto no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras normales [11], sin embargo, la tensión tiene importancia en el agrietamiento del concreto de cemento portland debido a la restricción de la contracción inducida por el secado o por la disminución de la temperatura.

Figura 2. Montaje ensayo a tensión indirecta

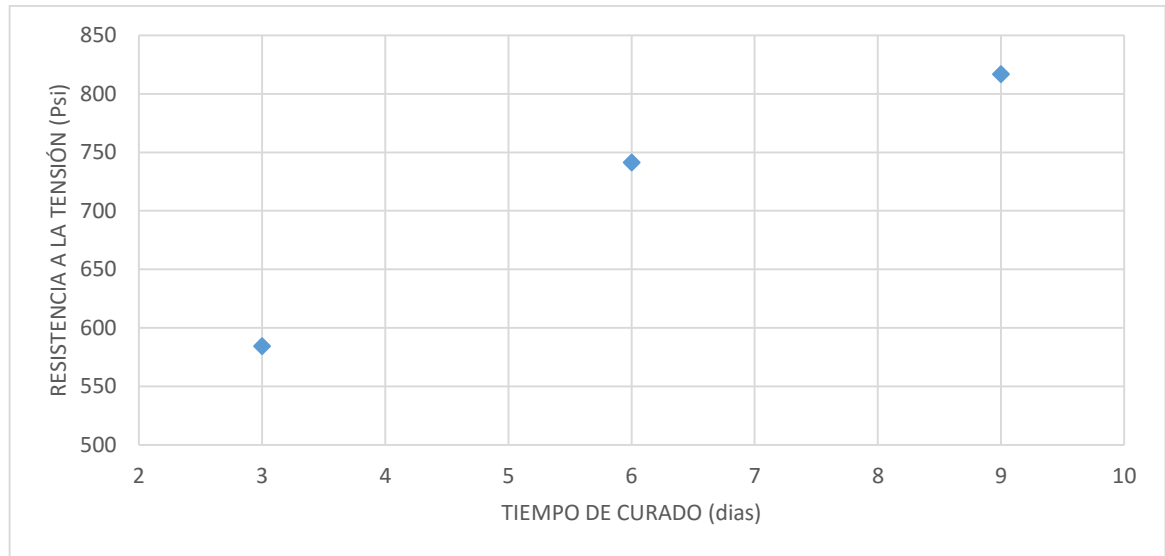


Fuente: Elaboración propia

Debido a la dificultad para medir la resistencia a tensión por un ensayo directo, se opta por pruebas indirectas, en este caso se utilizara la prueba brasileña o ensayo de tensión indirecta, según lo descrito en la ASTM-496 o su equivalente NTC 722, este ensayo consiste básicamente en la aplicación de una fuerza de compresión en la longitud del espécimen. Para una mejor distribución de la carga se emplean listones de apoyo de madera de acuerdo a las dimensiones descritas en la norma anteriormente mencionada.

3.2.1 Resultados y discusión ensayo de tensión. Como ya se ha mencionado la resistencia a tensión del concreto se encuentra alrededor de un 10% de la resistencia a compresión, del **grafico 4** se puede apreciar que la resistencia obtenida a tensión en este estudio es de alrededor del 8.5 % de la resistencia a compresión a los nueve días. Con base en esto podemos decir que el concreto tradicional de cemento portland y el concreto polimérico se comportan de manera similar a tensión.

Gráfico 4. Resistencia a la tensión probetas con 15 % de resina y $M_f/M_r=0.4$



Fuente: Elaboración propia

3.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD O MÓDULO DE YOUNG

El módulo de elasticidad es la propiedad que indica que tan rígido puede ser un material. Su estudio es importante porque sirve como parámetro para determinar las deformaciones que tiene un material ante la aplicación de carga.

3.3.1 Resultados y discusión ensayo módulo de elasticidad. En la **tabla 5** se puede observar los resultados del ensayo de módulo de elasticidad estático de los cilindros. La obtención de estos resultados y su procedimiento se puede apreciar en el anexo D.

Tabla 5. Módulo de elasticidad

ESPECIMEN	EDAD (DIAS)	EE (GPa)	EE PROM (GPa)	E NSR 10 (Gpa)	E NSR 10 PROM (Gpa)
PC-1504E3	3	12.43	13.43	35.97	36.10
TPC-1504E3	3	14.42		36.23	
PC-1504E6	6	15.82	14.22	38.04	38.16
TPC-1504E6	6	12.61		38.28	
PC-1504E9	9	14.29	14.66	38.38	38.49
TPC-1504E9	9	15.03		38.61	

Fuente: Elaboración propia

En la **tabla 5** se presentan los valores promedio del módulo elástico está calculado para dos especímenes con la misma edad de curado, en la columna cuatro se pueden identificar estos valores, y apreciar el aumento que se presenta a medida que pasa el tiempo, el método de cálculo usado es el descrito en la norma técnica colombiana 4025 o el método de la secante.

El bajo módulo de elasticidad es debido posiblemente al tipo de falla que presenta este tipo de concreto, ya que a diferencia del concreto tradicional no presenta una falla explosiva, por el contrario la falla observada al realizar el ensayo el espécimen presento inicialmente un ensanchamiento seguido de fisuras, por tanto se cree que tiene un comportamiento plástico, lo que explicaría la alta resistencia ante aplicación de cargas a pesar de su continua deformación.

Figura 3. Falla espécimen



Fuente: elaboración propia

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 1}$$

E_c: módulo de elasticidad

f'_c: resistencia a la compresión del concreto

normal

De la misma **tabla 5** se puede realizar una comparación del valor del módulo elástico calculado con la ecuación 1 descrita en la norma sismo resistente de 2010 (NRS 10), en donde se aprecia que el módulo del proyecto es menor al calculado por la ecuación en un 37%, eso debido a que la ecuación 1 está definida para concretos de cemento portland.

Para establecer una ecuación que nos proporcione un valor teórico del módulo de elasticidad con base en la resistencia a compresión del concreto polimérico, en la

ecuación 1 usamos los valores de resistencia a compresión y módulo de elasticidad obtenidos en el laboratorio, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$E_c = 1790 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 2}$$

E_c: módulo de elasticidad

f'_c: resistencia a la compresión del concreto

polimerico

Los valores del módulo elástico encontrados en este estudio son bajos comparados con los hallados por otros autores en donde se han obtenido valores de hasta 29 GPa, este valor es comparable al del concreto portland de alta resistencia. En tanto el valor hallado para este estudio se encuentra por debajo del módulo de elasticidad de un concreto de cemento portland normal [12].

3.4 ENSAYO DE ADHERENCIA ENTRE PARTÍCULAS O ENSAYO DE PULL-OUT

Con el fin de cuantificar la adherencia entre partículas de concreto, se propuso un ensayo similar al ensayo de pull-out, este método se basa en extraer un elemento que previamente ha sido embebido en el hormigón, midiendo la fuerza necesaria para lograr esa extracción. En este caso el concreto falla por esfuerzos de tensión y de cortante, lográndose una buena correlación con su resistencia a compresión. En este caso se insertaron dos barras de 3/8 in en probetas circulares de 3in de diámetro por 6in de largo.

La longitud de la barra embebida en el cilindro de concreto polimérico se planteó de $4d_b$, en este caso el diámetro de la barra utilizada es de 9.5 mm por lo que la longitud embebida es de aproximadamente 40 mm (4 cm), en la cara donde se realiza la extracción.

Figura 4. Montaje ensayo de adherencia

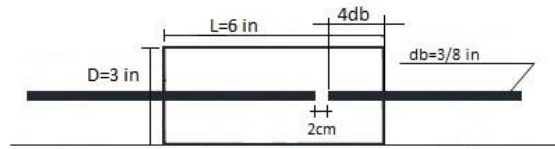


Fuente: Elaboración propia

El montaje que se observa en la **figura 4** se realizó en la máquina MTS 810 Material Test System, en la cual se le realizan ensayos de tensión al acero, esto planteo así ya que el laboratorio no cuenta con la máquina en la cual se pudiera realizar un ensayo más estandarizado. En el interior del espécimen, las barras se encuentran separadas 2cm, una de las barras esta embebida una longitud de 4db, es en esta cara en donde ocurre la falla.

En la **figura 5** se ilustra las probetas que se usaron en el ensayo de adherencia, la cantidad de ensayos realizados fueron cinco, un ensayo por día, con el fin de estudiar el comportamiento del concreto en su interior, los resultados de la fuerza de tensión necesaria para desprender la barra se relacionan en la **tabla 6**.

Figura 5. Probeta para ensayo de adherencia



Fuente: elaboración propia

3.4.1 Resultados y discusión ensayo de adherencia

Tabla 6. Resistencia a la adherencia

ESPECIMEN	Pu (KN)	Lm (mm)	db (mm)	Tu(Mpa)	ACI-318(Mpa)
PC-AD1	20,89	40	9,53	54,82	50,70
PC-AD2	21,08	40	9,53	55,32	50,70
PC-AD3	25,46	40	9,53	66,82	50,70
PC-AD4	25,78	40	9,53	67,67	50,70
PC-AD5	29,08	40	9,53	76,32	50,70

Fuente: Elaboración propia

De los valores registrados en la **tabla 6**, se puede observar que los valores obtenidos a partir del ensayo planteado son superiores a los valores de resistencia mínima requerida, resistencia que depende de la longitud de desarrollo calculada a partir de la fórmula expuesta en la NSR-10.

Figura 6. Falla ensayo pull-out



Fuente: elaboración propia

En la **figura 6** se observa que la falla se presenta a la profundidad a la cual ha sido embebida la barra, lo que significa que la falla se da en la parte más débil de sistema compuesto.

4. CONCLUSIONES

En la etapa de elección de la mezcla se observó que al adicionar un 12% de resina los especímenes presentan alta porosidad, baja trabajabilidad, lo que se refleja en los valores de resistencia obtenidos, los cuales son muy variables y no presentan el comportamiento esperado.

La importancia de la presencia del filler en la mezcla radica en que al mezclarse con la resina forma una pasta cementante que actúa como aglomerante o ligante dentro de la mezcla, proporcionándole una mejor manejabilidad a esta. Los especímenes elaborados sin filler arrojaron valores de resistencia de 3700 psi a 5000 psi durante los cinco días de ensayo, los cuales son bajos a los encontrados con la presencia del filler.

Comparando la resistencia a compresión del concreto polimérico elaborado en este estudio y el concreto de cemento portland tradicional se puede afirmar que para especímenes con un 12% de resina presente en la mezcla los valores de resistencia alcanzados son similares a los de un concreto de resistencia normal, los especímenes con 15% y 18 % de resina presente en la mezcla evidencian una superioridad del 35% de la resistencia a compresión, estos dos diseños alcanzan resistencias similares las cuales no tienen una diferencia significativa, por lo que se eligió el diseño con un 15 % de resina, debido a que representa un menor volumen de resina.

Al realizar los ensayos mecánicos a los especímenes elaborados con el diseño elegido se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de hasta 9800 Psi para un tiempo de curado de 9 días, valor que lo clasifica como un concreto de alta resistencia.

El comportamiento del concreto polimérico en cuanto a resistencia a tensión es similar al de concreto de cemento portland, debido a que los valores encontrados en el estudio se encuentran dentro del rango de 10 % de resistencia a la compresión tal y como menciona la literatura existente.

Una de las desventajas halladas en el desarrollo del estudio es que la mezcla tiene un tiempo de secado corto lo que dificultaría la aplicación de este en campo y en grandes cantidades, es por esto que se usa en elementos prefabricados.

Analizando los resultados obtenidos en este estudio, los valores promedio del módulo de elasticidad del concreto polimérico hallados según el ensayo son de: 13.43 GPa para especímenes de tres días de curado, 14.22 GPa para 6 días de curado, 14.66 GPa para nueve días de curado evidenciando un leve aumento a medida que aumenta el tiempo de curado.

Del ensayo de pull-out que se realizó en este estudio para evaluar la adherencia del concreto, se obtuvo que la fuerza necesaria para desprender la barra o fracturar el concreto es de 20.89 kN a 29.08 kN, las cuales nos permiten determinar una fuerza de adherencia T_u de 54.82 Mpa a 76.32 Mpa, que al comparar con la fuerza de unión mínima requerida es mayor en un 8 % a 33%, indicando que la cohesión entre los agregados y la pasta cementante es buena.

TRABAJOS CITADOS

- |
- [1] M. Valencia, P. Collazos , J. Mina y E. Toro , «"Caracterizacion fisicomecanica de concreto polimerico basado en resina poliester",» *Guillermo de Ockham*, pp. 83-93, 2010.
 - [2] D. Van Gemert , L. Czarnecki, M. Maultzsch, H. Schorn , A. Beeldens , P. Lukoswski y E. Knapen , «Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merging worlds. A report from 11 th ICPIIC congress in Berlin,» *Cement and concrete composites*, vol. 27, pp. 926-933, 2005.
 - [3] J. Proszek Gorniski y C. Souza Kazmierczak, *Concreto docencia investigacion y logros*, vol. Vol 2, Sao Paulo, 2005, pp. 1392-1412.
 - [4] G. Martinez Barrera , S. Vigueras , O. Gencel y H. Hagg Lobland , «Polymer concretes: A description and methods for modification and improvement,» *Journal of Materials Education*, vol. 33, pp. 37-52, 2011.
 - [5] J. S. Reyes Bautista y Y. A. Rodriguez Pineda, «Analisis de la resistencia a la compresion del concreto al adicionar limalla fina en un 3%, 4% y 5% respecto al peso de la mezcla,» Bucaramanga, 2010.
 - [6] R. Bedi , R. Chandra y A. Singh , «Mechanical properties of polymer concrete,» *Hindaw publishing corporation* , pp. 1-12, 2013.
 - [7] ICONTEC, *NTC 673 Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilindricos de concreto*, Bogotá: Instituto colombiano de normas tecnicas y certificación, 2010.
 - [8] M. Muthukumar y D. Mohan , «Studies on polymer concrete based on optimized aggregate mix proporióón,» *Europa polymer journal*, vol. 40, pp. 2167-2177, 2004.
 - [9] M. C. d. S. Ribeiro, «New Polymer Mortar Formulation "Development, Characcterization and Application Forms",» porto, 2006.

- [10] D. S. d. Guzman, *Concretos y Morteros. Manejo y Colocacion en Obra*, 2 ed., Bogotá: Asocreto, 1998, p. 27.
- [11] G. A. R. L., *Concreto Simple*.
- [12] J. Gominski Proszek, D. Dal Molin C y C. Kazmierczak , «Study of thr modulus of elasticity of polymers concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and porland cement concrete,» *Cement and concrete research*, vol. 34, pp. 2091-2095, 2004.

BIBLIOGRAFIA

- A.M. Neville, J. B. (2010). *Concrete Technology* . Harlow, Essex CM20 2JE: Pearson Education Limited.
- Abdel-Fattah , H., & El-HAwary , M. (1999). Flexure behavior of polymer concrete. *Construcción and bulding materials*, 13, 253-262.
- Bedi , R., Chandra , R., & Singh , A. (2013). Mechanical properties of polymer concrete . *Hindaw publishing corporati3n* , 1-12.
- Czarnecki, L., GArbacz, A., & Kurach , J. (2001). On the characterization of polymer concrete fracture surface. *Cement and concrete composite*, 23, 399-409.
- Fowelr , D. (1999). Polymers in concrete: A vision for the 21st century. *Cement an concrete composites*, 21, 449-452.
- Gominski Proszek, J., Dal Molin C, D., & Kazmierczak , C. (2004). Study of thr modulus of elasticity of polymers concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and porland cement concrete. *Cement and concrete research*, 34, 2091-2095.
- Guzman, D. S. (1998). *Concretos y Morteros. Manejo y Colocacion en Obra* (2 ed.). Bogotá: Asocreto.
- ICONTEC. (2010). NTC 673 Ensayo de resistencia a la compresi3n de espec3menes cilindricos de concreto. Bogotá: Instituto colombiano de normas tecnicas y certificaci3n.
- L., G. A. (s.f.). *Concreto Simple*.
- Martinez Barrera , G., Vigueras , S., Gencel , O., & Hagg Lobland , H. (2011). Polymer concretes: A description and methods for modification and improvement. *Journal of Materials Education*, 33, 37-52.
- Martinez Barrera, G., Martinez Cruz , E., & Martinez Lopez , M. (2012). Concreto polimerico reforzado con fibras: efecto de la radiacion gamma. *iberoamerica de Polimeros*, 13, 164-178.

- Muthukumar , M., & Mohan , D. (2004). Studies on polymer concrete based on optimized aggregate mix propoición. *Europena polymer journal*, 40, 2167-2177.
- Ochoa , A., Villar , A., Becerra , J., & Jimenez , C. (2012). *Determinacion del asentamiento y la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto curados y preparados de acuerdo con la norma 1377 (NTC 1377,NTC 396, NTC 673)*. Tunja : UPTC.
- Orak , S. (2000). Investigación of vibration damping on polymer concrete whit polyester resin. *Cement and concrete research*, 30, 171-174.
- Proszek Gorniski, J., & Souza Kazmierczak, C. (2005). *Concreto docencia investigacion y logros* (Vol. Vol 2). Sao Paulo.
- Reyes Bautista, J. S., & Rodriguez Pineda, Y. A. (2010). *Analisis de la resistencia a la compresion del concreto al adicionar limalla fina en un 3%, 4% y 5% respecto al peso de la mezcla*. Bucaramanga.
- Ribeiro, M. C. (2006). *New Polymer Mortar Formulation "Development, Characcterization and Application Forms"*. porto.
- Sun-Woo, K., Hyun-Do, Y., Wan-Shin, P., & Young-II, J. (2015). Bond strength prediction for deformat steel rebar embeddedin recycled coarse aggregate concrete. *Materials and Design*, 257-269.
- Valencia, M., Collazos , P., Mina , J., & Toro , E. (2010). Caracterización fisicomecanica de concreto polimerico basaod en resina poliester. *Guillermo de Ockham* , 83-93.
- Van Gemert , D., Czarnecki, L., Maultzsch, M., Schorn , H., Beeldens , A., Lukowski , P., & Knapen , E. (2005). Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merning worlds. A report from 11 th ICPC congress in Berlin. *Cement and concrete composites*, 27, 926-933.

ANEXOS

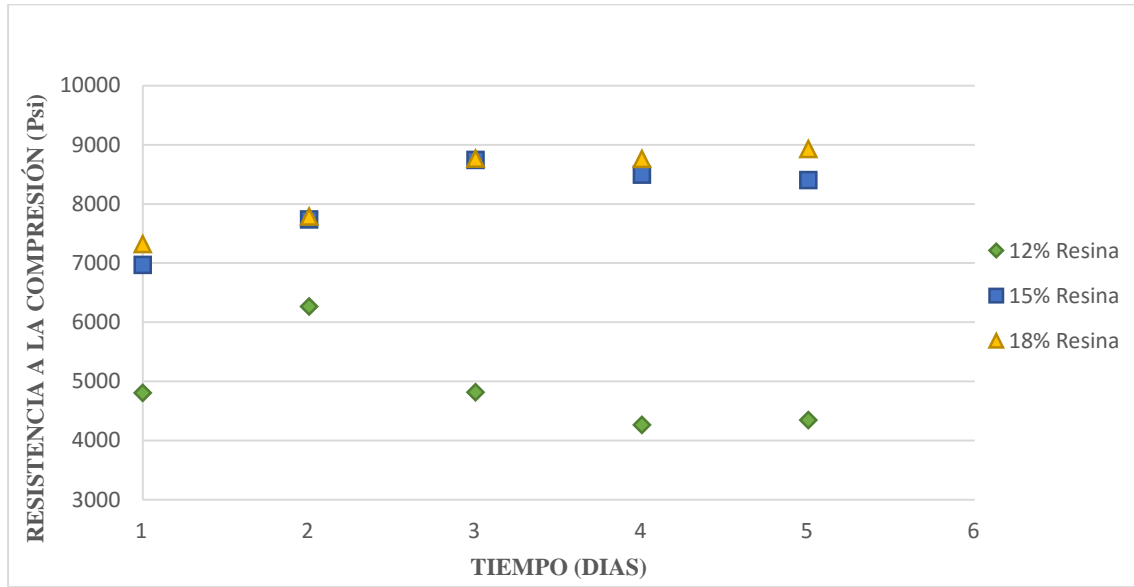
Anexo A. Resultados resistencia a compresión especímenes con relación de $M_f/M_r=0.3, 0.4$ Y 0.5

En este anexo se exponen los datos de los ensayos preliminares de resistencia a compresión para probetas de diámetro 3 in y 6 in de longitud, con $M_f/M_r=0.3, 0.4$, y 0.5

Tabla A1. Resultados de resistencia a compresión $M_f/M_r= 0.3$

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS ESPECIMENES

Días de Curado	% resina	M_f/M_r	probeta	carga soportada (KN)	Área (cm ²)	$f'c$ (MPa)	$f'c$ (Psi)	Peso (Kg)
Día 1	12	0.3	PC1-123	151	45.60	33.11	4802.40	1478
	15	0.3	PC1-153	219.1	45.60	48.04	6968.25	1514
	18	0.3	PC1-183	230.2	45.60	50.48	7321.27	1336
Día 2	12	0.3	PC2-123	197	45.60	43.20	6265.38	1489
	15	0.3	PC2-153	243.3	45.60	53.35	7737.90	1503
	18	0.3	PC2-183	244.9	45.60	53.70	7788.79	1492
Día 3	12	0.3	PC3-123	151.5	45.60	33.22	4818.30	1380
	15	0.3	PC3-153	274.9	45.60	60.28	8742.91	1510
	18	0.3	PC3-183	275.6	45.60	60.43	8765.17	1528
Día 4	12	0.3	PC4-123	134	45.60	29.38	4261.73	1394
	15	0.3	PC4-153	267.1	45.60	58.57	8494.84	1492
	18	0.3	PC4-183	275.5	45.60	60.41	8761.99	1450
Día 5	12	0.3	PC5-123	136.6	45.60	29.95	4344.42	1352
	15	0.3	PC5-153	264.2	45.60	57.93	8402.60	1528
	18	0.3	PC5-183	280.7	45.60	61.55	8927.37	1456



FiguraA1. Representación gráfica de los datos de resistencia a compresión.

Tabla A2. Resultados de resistencia a compresión $M_f/M_r = 0.4$

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS ESPECIMENES

Días de curado	% resina	M_f/M_r	probeta	carga soportada (KN)	Área (cm ²)	$f'c$ (MPa)	$f'c$ (Psi)	Peso (Kg)
Día 1	12	0.4	PC1-124	150.2	45.60	32.94	4776.95	1392
	15	0.4	PC1-154	236.4	45.60	51.84	7518.45	1526
	18	0.4	PC1-184	235.7	45.60	51.68	7496.19	1484
Día 2	12	0.4	PC2-124	124.1	45.60	27.21	3946.87	1376
	15	0.4	PC2-154	232.7	45.60	51.03	7400.78	1504
	18	0.4	PC2-184	239.1	45.60	52.43	7604.32	1474
Día 3	12	0.4	PC3-124	122.5	45.60	26.86	3895.98	1384
	15	0.4	PC3-154	241.6	45.60	52.98	7683.83	1526
	18	0.4	PC3-184	252.1	45.60	55.28	8017.78	1462
Día 4	12	0.4	PC4-124	133.8	45.60	29.34	4255.37	1376
	15	0.4	PC4-154	282.6	45.60	61.97	8987.80	1492
	18	0.4	PC4-184	269.4	45.60	59.07	8567.98	1460
Día 5	12	0.4	PC5-124	240.1	45.60	52.65	7636.13	1372
	15	0.4	PC5-154	289.5	45.60	63.48	9207.24	1486
	18	0.4	PC5-184	285.5	45.60	62.60	9080.03	1464
Día 28	12	0.4	PC28-124	239.7	45.60	52.56	7623.41	1506
	15	0.4	PC28-154	269.8	45.60	59.16	8580.71	1516
	18	0.4	PC28-184	272.3	45.60	59.71	8660.22	1474

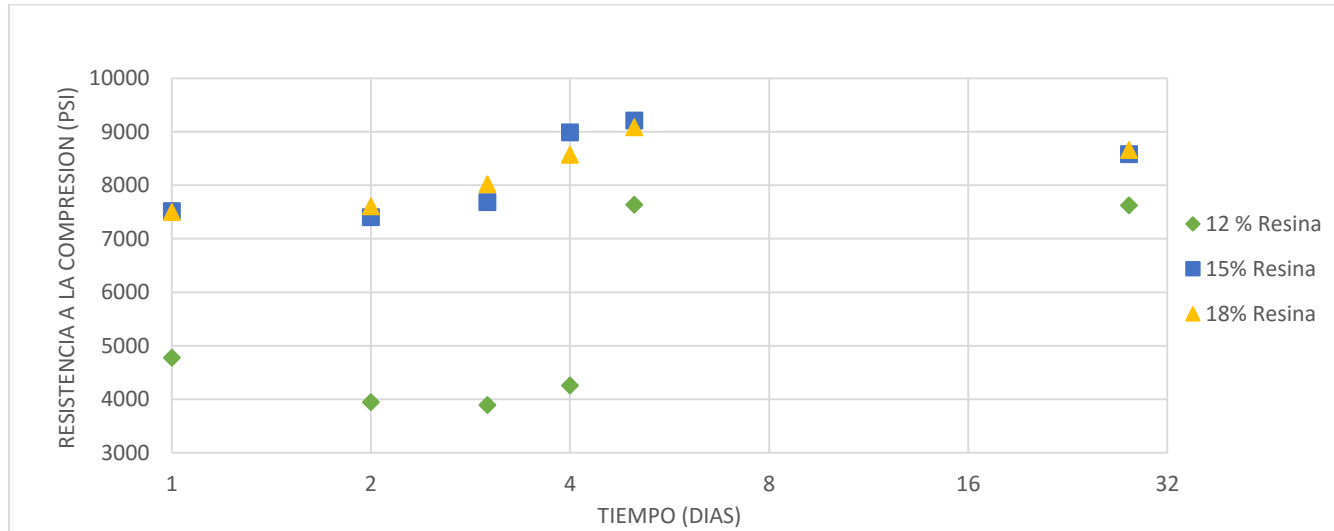


Figura A2. Representación gráfica de los datos de resistencia a compresión.

Tabla A3. Resultados de resistencia a compresión $M_f/M_r = 0.5$

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS ESPECIMENES

Días de curado	% resina	M_f/M_r	probeta	carga soportada (KN)	Área (cm ²)	$f'c$ (MPa)	$f'c$ (Psi)	Peso (Kg)
Día 1	12	0.5	PC1-125	216.6	45.60	47.50	6888.74	1464
	15	0.5	PC1-155	252.1	45.60	55.28	8017.78	1544
	18	0.5	PC1-185	243.4	45.60	53.37	7741.08	1444
Dia 2	12	0.5	PC2-125	221.5	45.60	48.57	7044.58	1426
	15	0.5	PC2-155	279.5	45.60	61.29	8889.20	1456
	18	0.5	PC2-185	268	45.60	58.77	8523.46	1416
Dia 3	12	0.5	PC3-125	240.2	45.60	52.67	7639.31	1436
	15	0.5	PC3-155	279.9	45.60	61.38	8901.93	1568
	18	0.5	PC3-185	269.3	45.60	59.05	8564.80	1464
	12	0.5	PC4-125	198.8	45.60	43.59	6322.63	1424

Dia 4	15	0.5	PC4-155	281.3	45.60	61.68	8946.45	1510
	18	0.5	PC4-185	284.3	45.60	62.34	9041.86	1492
Dia 5	12	0.5	PC5-125	220.4	45.60	48.33	7009.59	1474
	15	0.5	PC5-155	285.1	45.60	62.52	9067.31	1498
	18	0.5	PC5-185	272.2	45.60	59.69	8657.04	1492

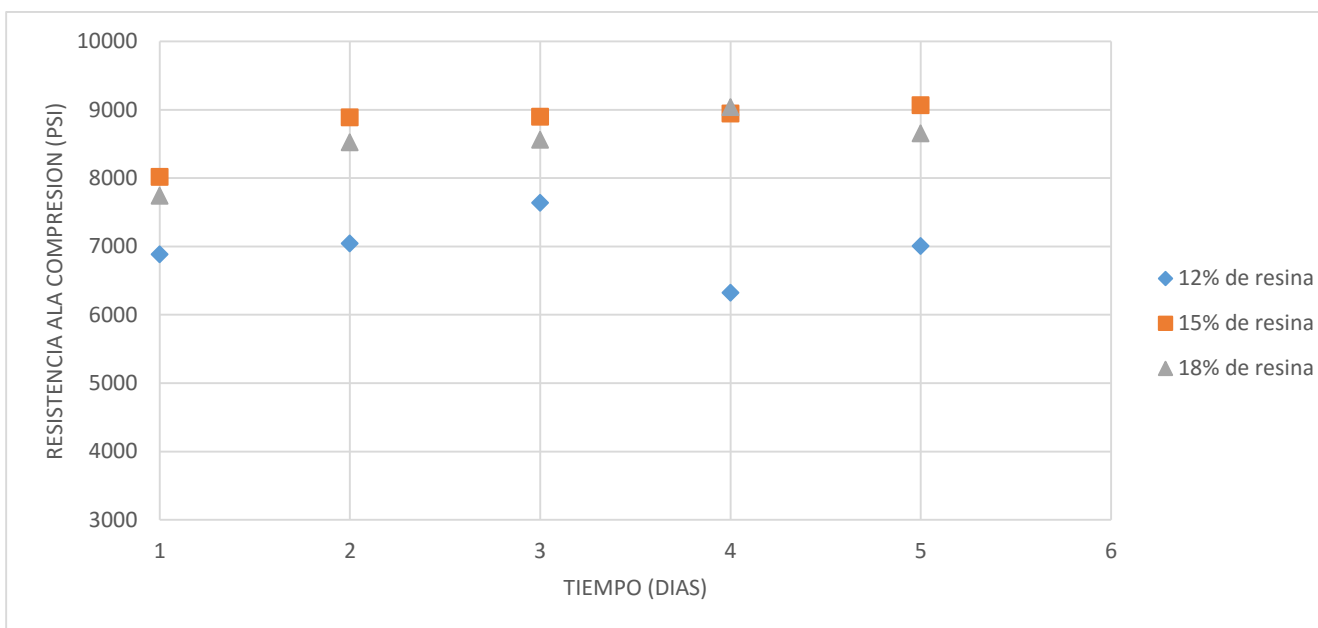


Figura A3. Representación gráfica de los datos de resistencia a compresión.

Tabla A4. Datos resistencia a compresión Mr/Mf=0.0

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS ESPECIMENES

Tiempo	% resina	Mf/Mr	probeta	carga soportada (KN)	Área (cm2)	F'c (Mpa)	F'c (Psi)
Dia 1	15	0.4	PC-15001	117.5	45.60	25.77	3736.96
Dia 2	15	0.4	PC-15002	116.5	45.60	25.55	3705.16
Dia 3	15	0.4	PC-15003	129.2	45.60	28.33	4109.07
Dia 4	15	0.4	PC-15004	142.4	45.60	31.23	4528.88
Dia 5	15	0.4	PC-15005	156.9	45.60	34.41	4990.04

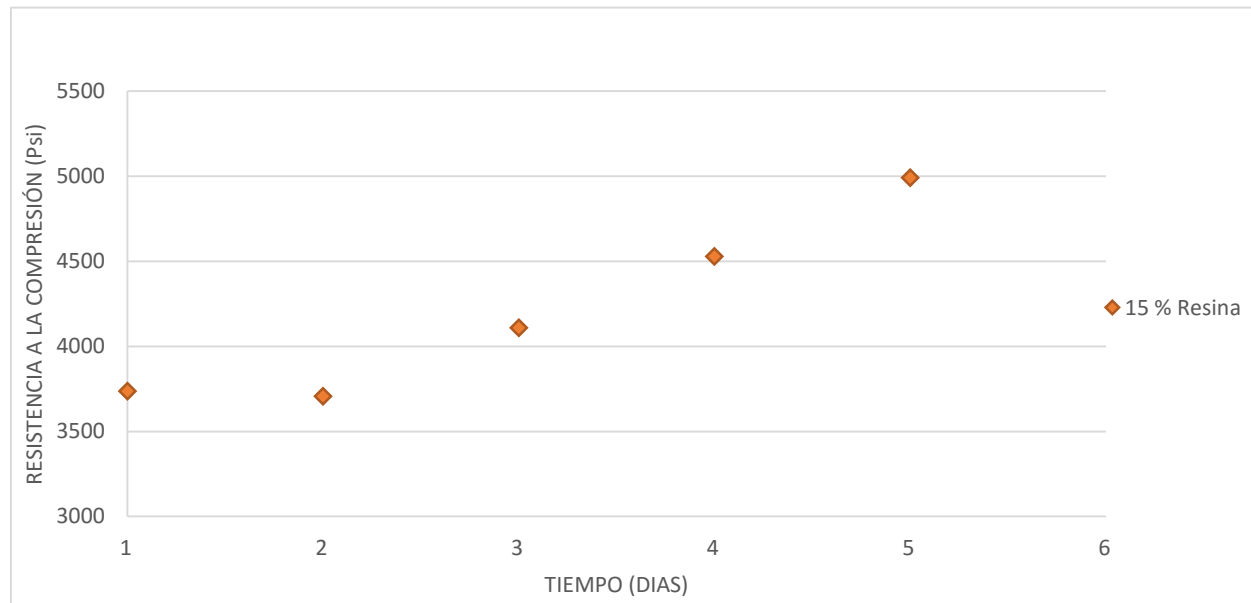


Figura A4. Representación gráfica de los datos.

Anexo B. Resultado final de la resistencia a compresión

En este anexo se presentan los resultados obtenidos del ensayo definitivo de resistencia a compresión para especímenes de 4 in de diámetro y de 8 in de longitud, los especímenes fueron elaborados con la mezcla óptima.

Tabla B1. Resistencia a compresión $M_f/M_r = 0.4$ y resina = 15 %

RESISTENCIA A COMPRESION DE LOS ESPECIMENES

Tiempo	Probeta	% resina	M_f/M_r	carga soportada (KN)	Área (cm ²)	$f'c$ (MPa)	$f'c$ (Psi)	$f'c$ (Psi)
Dia 3	PC3-1504	15	0.4	474.9	81.07	58.58	8496.00	8557.00
	T-PC3	15	0.4	481.7	81.07	59.42	8618.00	
Dia 6	PC6-1504	15	0.4	531	81.07	65.50	9500.00	9561.00
	T-PC6	15	0.4	537.8	81.07	66.34	9622.00	
Dia 9	PC9-1504	15	0.4	540.5	81.07	66.67	9670.00	9729.00
	T-PC9	15	0.4	547.1	81.07	67.48	9788.00	

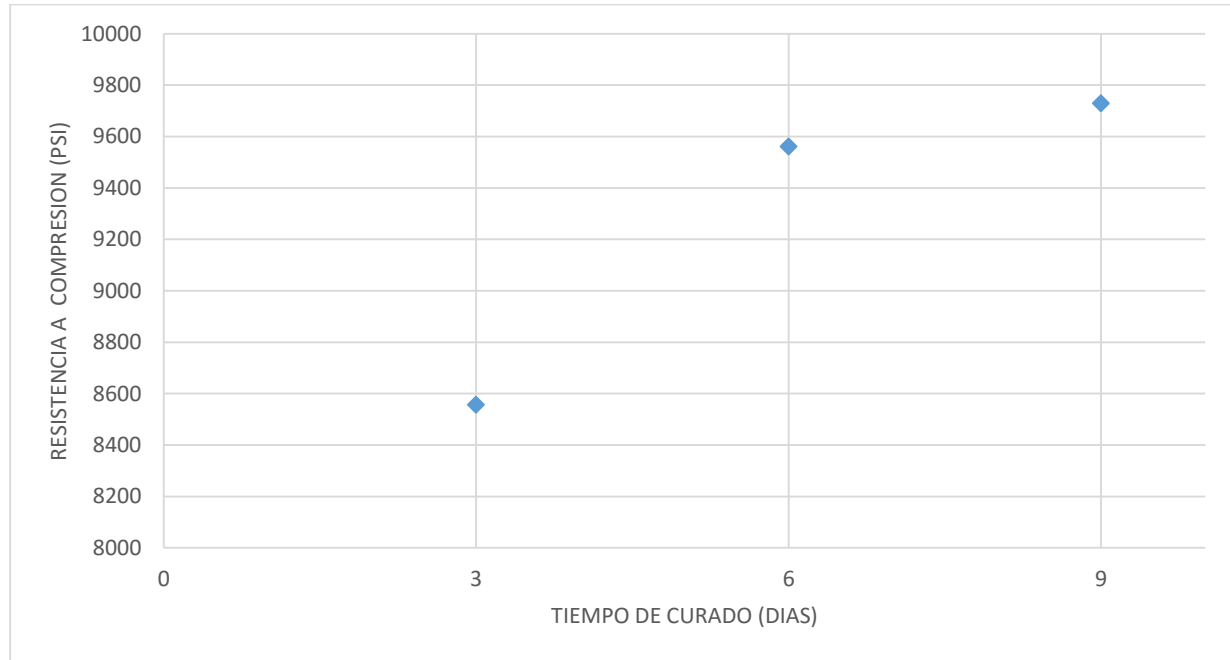


Figura B1. Representación gráfica de los resultados de resistencia a compresión.

Anexo C. Resultados a la tensión (ensayo de tracción indirecta)

En este anexo se presentan los resultados del ensayo definitivo de resistencia a tensión del concreto polimérico.

Tabla C1. Resistencia a tensión

RESISTENCIA A LA TENSIÓN (ENSAYO DE TRACCION DIRECTA)

DIAS	ESPECIMEN	% DE RESINA	Mf/Mr	CARGA (KN)	LONGITUD (mm)	DIAMETRO (mm)	T (MPa)	T(Psi)	T(Psi)
3	PC-T3	15	0.4	277.58	300	150	3.927	569.554	584.276
	TPC-T3	15	0.4	291.93	300	150	4.130	598.998	
6	PC-T6	15	0.4	361.34	300	150	5.112	741.417	741.417
	TPC-T6	15	0.4	361.34	300	150	5.112	741.417	
9	PC-T9	15	0.4	365.16	300	150	5.166	749.255	816.915
	TPC-T9	15	0.4	431.11	300	150	6.099	884.575	

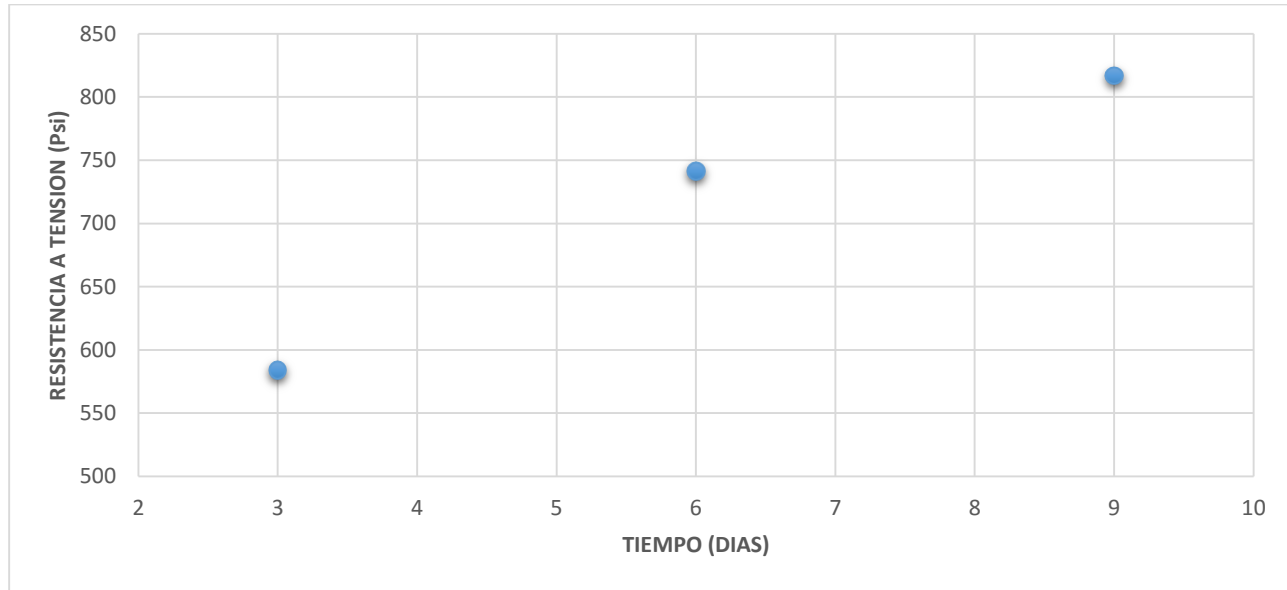


Figura C1. Representación gráfica de los datos.

Anexo D. Módulo elástico por el método de la secante

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\varepsilon_2 - 0,000\ 050)}$$

en donde

- E = módulo de elasticidad secante, en MPa (psi)
- S_2 = esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga última.
- S_1 = esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal, ε_1 , de las 50 millonésimas, en MPa.
- ε_2 = deformación longitudinal producida por el esfuerzo S_2 .

Tabla D1. Datos para el cálculo del módulo de elasticidad
Módulo Elástico 3 Días

PC-1504E3		TPC-1504E3	
S2 (Psi)	3398.4	S2 (Psi)	3447.2
D1	212.915	s1 (Psi)	210.1
e2	0.001817	e2	0.00159782
E (MPa)	12429.62742	E (MPa)	14419.6513
E Promedio (MPa)		13426	

Tabla D2. Datos para determinar el módulo elástico

ENSAYO PARA DETERMINAR EL MODULO ELASTICO A TRES DIAS DE CUARADO					
CARGA (KN)	ESFUERZO (Mpa)	PC-1504E3		TPC-1504E3	
		DEFORMACIÓN (mm)	DEFORMACION UNITARIA	DEFORMACIÓN (mm)	DEFORMACIÓN UNITARIA
5	0,274	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	0,548	0,00E+00	0,00E+00	1,27E-03	4,23E-06
15	0,822	1,78E-03	5,93E-06	3,81E-03	1,27E-05
20	1,096	6,35E-03	2,12E-05	8,89E-03	2,96E-05
40	2,193	3,18E-02	1,06E-04	2,79E-02	9,31E-05
60	3,289	5,59E-02	1,86E-04	4,57E-02	1,52E-04
80	4,386	8,26E-02	2,75E-04	7,87E-02	2,62E-04
100	5,482	1,08E-01	3,60E-04	8,89E-02	2,96E-04
120	6,578	1,32E-01	4,40E-04	1,12E-01	3,73E-04
140	7,675	1,59E-01	5,29E-04	1,32E-01	4,40E-04
160	8,771	1,83E-01	6,10E-04	1,52E-01	5,08E-04
180	9,868	2,08E-01	6,94E-04	1,73E-01	5,76E-04
200	10,964	2,35E-01	7,83E-04	1,96E-01	6,52E-04
220	12,060	2,62E-01	8,72E-04	2,24E-01	7,45E-04
240	13,157	2,87E-01	9,57E-04	2,46E-01	8,21E-04
260	14,253	3,12E-01	1,04E-03	2,67E-01	8,89E-04
280	15,350	3,40E-01	1,13E-03	2,90E-01	9,65E-04
300	16,446	3,66E-01	1,22E-03	3,10E-01	1,03E-03
320	17,542	3,91E-01	1,30E-03	3,35E-01	1,12E-03
340	18,639	4,19E-01	1,40E-03	3,73E-01	1,24E-03
360	19,735	4,45E-01	1,48E-03	3,91E-01	1,30E-03
380	20,832	4,74E-01	1,58E-03	4,11E-01	1,37E-03
400	21,928	5,03E-01	1,68E-03	4,27E-01	1,42E-03
420	23,024	5,33E-01	1,78E-03	4,60E-01	1,53E-03
440	24,121	5,64E-01	1,88E-03	4,90E-01	1,63E-03
460	25,217	5,97E-01	1,99E-03	5,18E-01	1,73E-03
480	26,314	6,22E-01	2,07E-03	5,46E-01	1,82E-03
500	27,410	6,78E-01	2,26E-03	5,74E-01	1,91E-03
520	28,506	7,06E-01	2,35E-03	6,02E-01	2,01E-03
540	29,603	7,59E-01	2,53E-03	6,32E-01	2,11E-03
560	30,699	8,10E-01	2,70E-03	6,63E-01	2,21E-03
580	31,796	8,61E-01	2,87E-03	6,96E-01	2,32E-03
600	32,892	9,12E-01	3,04E-03	7,26E-01	2,42E-03
620	33,988	9,47E-01	3,16E-03	7,57E-01	2,52E-03
640	35,085	9,86E-01	3,29E-03	7,92E-01	2,64E-03
660	36,181	1,03E+00	3,43E-03	8,23E-01	2,74E-03
680	37,278	1,06E+00	3,55E-03	8,59E-01	2,86E-03
700	38,374	1,10E+00	3,68E-03	8,97E-01	2,99E-03
720	39,471	1,15E+00	3,83E-03	9,32E-01	3,11E-03
740	40,567	1,19E+00	3,95E-03	9,70E-01	3,23E-03
760	41,663	1,24E+00	4,12E-03	1,01E+00	3,38E-03
780	42,760	1,31E+00	4,35E-03	1,05E+00	3,51E-03
800	43,856	1,41E+00	4,69E-03	1,10E+00	3,67E-03
820	44,953	1,49E+00	4,96E-03	1,15E+00	3,82E-03
840	46,049	1,57E+00	5,24E-03	1,20E+00	4,00E-03
860	47,145	1,67E+00	5,57E-03	1,26E+00	4,19E-03

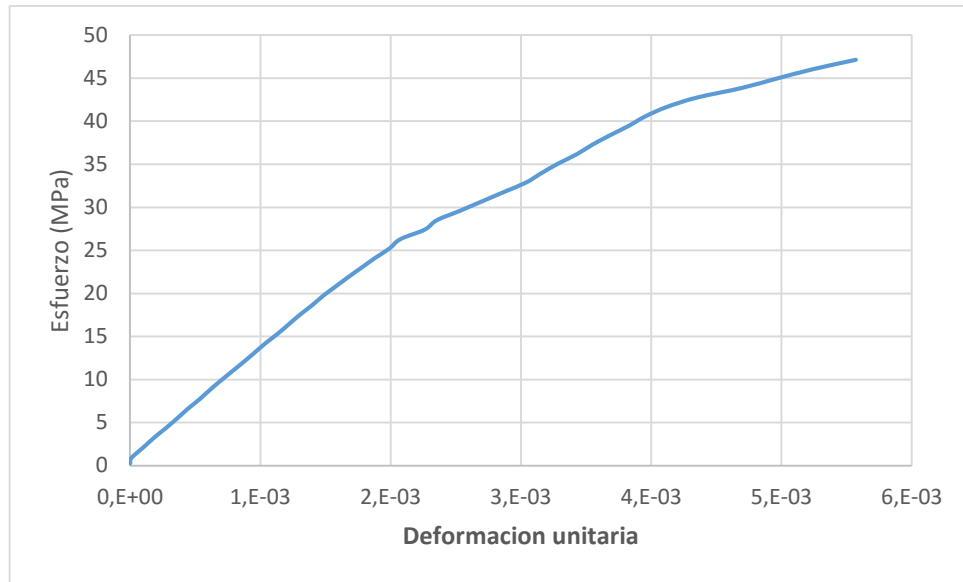


Figura E1. Representación gráfica de los resultados para el espécimen PC-1504E3

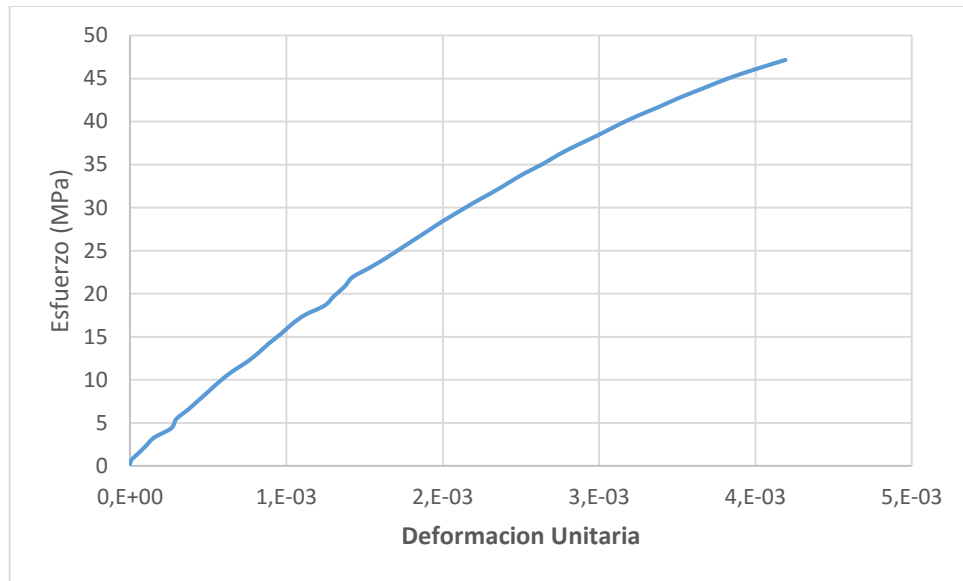


Figura E2. Representación gráfica de los resultados para el espécimen TPC-1504E3

Tabla D3. Datos para determinar el módulo elástico

ENSAYO PARA DETERMINAR EL MODULO ELASTICO A SEIS DIAS DE CUARADO					
CARGA (KN)	ESFUERZO (Mpa)	PC-1504E6		TPC-1504E6	
		DEFORMACIÓN (mm)	DEFORMACION UNITARIA	DEFORMACIÓN (mm)	DEFORMACIÓN UNITARIA
5	0,274	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	0,548	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
15	0,822	2,54E-03	8,47E-06	2,54E-03	8,47E-06
20	1,096	6,35E-03	2,12E-05	5,84E-03	1,95E-05
40	2,193	2,29E-02	7,62E-05	2,54E-02	8,47E-05
60	3,289	3,81E-02	1,27E-04	4,57E-02	1,52E-04
80	4,386	5,59E-02	1,86E-04	6,73E-02	2,24E-04
100	5,482	7,24E-02	2,41E-04	9,14E-02	3,05E-04
120	6,578	9,14E-02	3,05E-04	1,14E-01	3,81E-04
140	7,675	1,14E-01	3,81E-04	1,37E-01	4,57E-04
160	8,771	1,40E-01	4,66E-04	1,60E-01	5,33E-04
180	9,868	1,45E-01	4,83E-04	1,80E-01	6,01E-04
200	10,964	1,68E-01	5,59E-04	2,03E-01	6,77E-04
220	12,060	1,91E-01	6,35E-04	2,29E-01	7,62E-04
240	13,157	2,11E-01	7,03E-04	2,49E-01	8,30E-04
260	14,253	2,31E-01	7,70E-04	2,74E-01	9,14E-04
280	15,350	2,53E-01	8,42E-04	3,00E-01	9,99E-04
300	16,446	2,72E-01	9,06E-04	3,30E-01	1,10E-03
320	17,542	2,93E-01	9,78E-04	3,56E-01	1,19E-03
340	18,639	3,18E-01	1,06E-03	3,84E-01	1,28E-03
360	19,735	3,43E-01	1,14E-03	4,09E-01	1,36E-03
380	20,832	3,63E-01	1,21E-03	4,37E-01	1,46E-03
400	21,928	3,85E-01	1,28E-03	4,70E-01	1,57E-03
420	23,024	4,09E-01	1,36E-03	4,98E-01	1,66E-03
440	24,121	4,32E-01	1,44E-03	5,33E-01	1,78E-03
460	25,217	4,57E-01	1,52E-03	5,64E-01	1,88E-03
480	26,314	4,83E-01	1,61E-03	5,99E-01	2,00E-03
500	27,410	5,03E-01	1,68E-03	6,40E-01	2,13E-03
520	28,506	5,23E-01	1,74E-03	6,71E-01	2,24E-03
540	29,603	5,36E-01	1,79E-03	7,09E-01	2,36E-03
560	30,699	5,69E-01	1,90E-03	7,39E-01	2,46E-03
580	31,796	5,84E-01	1,95E-03	7,77E-01	2,59E-03
600	32,892	6,10E-01	2,03E-03	8,18E-01	2,73E-03
620	33,988	6,35E-01	2,12E-03	8,59E-01	2,86E-03
640	35,085	6,60E-01	2,20E-03	9,04E-01	3,01E-03
660	36,181	6,83E-01	2,28E-03	9,47E-01	3,16E-03
680	37,278	7,11E-01	2,37E-03	9,96E-01	3,32E-03
700	38,374	7,39E-01	2,46E-03	1,05E+00	3,51E-03
720	39,471	7,67E-01	2,56E-03	1,09E+00	3,64E-03
740	40,567	8,00E-01	2,67E-03	1,15E+00	3,83E-03
760	41,663	8,33E-01	2,78E-03	1,21E+00	4,02E-03
780	42,760	8,56E-01	2,85E-03	1,27E+00	4,23E-03
800	43,856	9,09E-01	3,03E-03	1,34E+00	4,47E-03
820	44,953	9,50E-01	3,17E-03	1,40E+00	4,68E-03
840	46,049	9,88E-01	3,29E-03	1,44E+00	4,79E-03
860	47,145	1,04E+00	3,47E-03	1,58E+00	5,26E-03

Tabla D4. Datos para determinar el módulo elástico

Módulo Elástico 6 Días

S2 (Psi)	3800	S2 (Psi)	3848.8
s1 (Psi)	242.267	s1 (Psi)	233.40
e2	1.60E-03	e2	0.0020263
E (MPa)	15819.09	E (MPa)	12613.12
E (MPa) Promedio		14216.10	

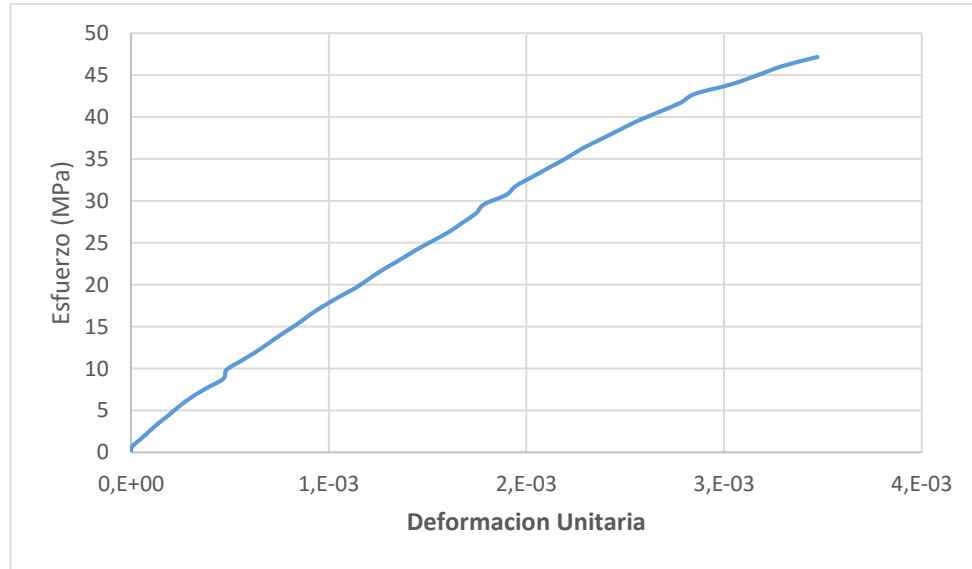


Figura E3. Representación gráfica de los resultados para el espécimen PC-1504E6

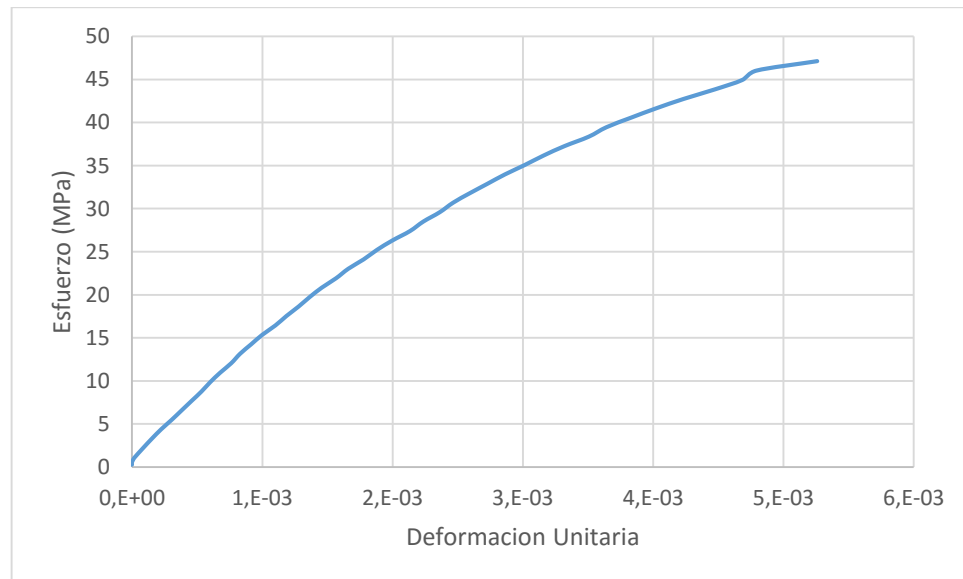


Figura E4. Representación gráfica de los resultados para el espécimen TPC-1504E6

Tabla D5. Datos para determinar el módulo elástico

ENSAYO PARA DETERMINAR EL MODULO ELASTICO A NUEVE DIAS DE CUARADO					
CARGA (KN)	ESFUERZO (Mpa)	PC-1504E9		TPC-1504E9	
		DEFORMACIÓN (mm)	DEFORMACION UNITARIA	DEFORMACIÓN (mm)	DEFORMACIÓN UNITARIA
5	0,274	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	0,548	2,29E-03	7,62E-06	0,00E+00	0,00E+00
15	0,822	4,32E-03	1,44E-05	3,81E-03	1,27E-05
20	1,096	1,02E-02	3,39E-05	8,89E-03	2,96E-05
40	2,193	2,54E-02	8,47E-05	2,54E-02	8,47E-05
60	3,289	4,32E-02	1,44E-04	4,32E-02	1,44E-04
80	4,386	6,10E-02	2,03E-04	6,35E-02	2,12E-04
100	5,482	8,00E-02	2,67E-04	8,13E-02	2,71E-04
120	6,578	9,91E-02	3,30E-04	1,02E-01	3,39E-04
140	7,675	1,19E-01	3,98E-04	1,24E-01	4,15E-04
160	8,771	1,45E-01	4,83E-04	1,45E-01	4,83E-04
180	9,868	1,65E-01	5,50E-04	1,65E-01	5,50E-04
200	10,964	1,85E-01	6,18E-04	1,85E-01	6,18E-04
220	12,060	2,11E-01	7,03E-04	2,06E-01	6,86E-04
240	13,157	2,32E-01	7,75E-04	2,26E-01	7,54E-04
260	14,253	2,57E-01	8,55E-04	2,49E-01	8,30E-04
280	15,350	2,82E-01	9,40E-04	2,72E-01	9,06E-04
300	16,446	3,05E-01	1,02E-03	2,95E-01	9,82E-04
320	17,542	3,30E-01	1,10E-03	3,16E-01	1,05E-03
340	18,639	3,53E-01	1,18E-03	3,38E-01	1,13E-03
360	19,735	3,81E-01	1,27E-03	3,61E-01	1,20E-03
380	20,832	4,06E-01	1,35E-03	3,86E-01	1,29E-03
400	21,928	4,29E-01	1,43E-03	4,11E-01	1,37E-03
420	23,024	4,55E-01	1,52E-03	4,34E-01	1,45E-03
440	24,121	4,83E-01	1,61E-03	4,57E-01	1,52E-03
460	25,217	5,08E-01	1,69E-03	4,83E-01	1,61E-03
480	26,314	5,36E-01	1,79E-03	5,08E-01	1,69E-03
500	27,410	5,61E-01	1,87E-03	5,33E-01	1,78E-03
520	28,506	5,92E-01	1,97E-03	5,59E-01	1,86E-03
540	29,603	6,17E-01	2,06E-03	5,87E-01	1,96E-03
560	30,699	6,50E-01	2,17E-03	6,10E-01	2,03E-03
580	31,796	6,78E-01	2,26E-03	6,40E-01	2,13E-03
600	32,892	7,04E-01	2,35E-03	6,68E-01	2,23E-03
620	33,988	7,42E-01	2,47E-03	6,99E-01	2,33E-03
640	35,085	7,75E-01	2,58E-03	7,26E-01	2,42E-03
660	36,181	8,03E-01	2,68E-03	7,57E-01	2,52E-03
680	37,278	8,36E-01	2,79E-03	7,87E-01	2,62E-03
700	38,374	8,66E-01	2,89E-03	8,23E-01	2,74E-03
720	39,471	8,97E-01	2,99E-03	8,59E-01	2,86E-03
740	40,567	9,32E-01	3,11E-03	8,94E-01	2,98E-03
760	41,663	9,68E-01	3,23E-03	9,32E-01	3,11E-03
780	42,760	1,01E+00	3,36E-03	9,68E-01	3,23E-03
800	43,856	1,05E+00	3,50E-03	1,01E+00	3,35E-03
820	44,953	1,09E+00	3,63E-03	1,05E+00	3,51E-03
840	46,049	1,15E+00	3,82E-03	1,09E+00	3,65E-03
860	47,145	1,19E+00	3,98E-03	1,14E+00	3,80E-03

Tabla D6. Datos para determinar el módulo elástico

Módulo Elástico 9 Días

S2 (Psi)	3868	v	3915.2
s1 (Psi)	209.42	s1 (Psi)	217.89
e2	0.0018158	e2	1.75E-03
E (MPa)	14285.34	E (MPa)	15034.23
E (MPa) Promedio		14659.78175	

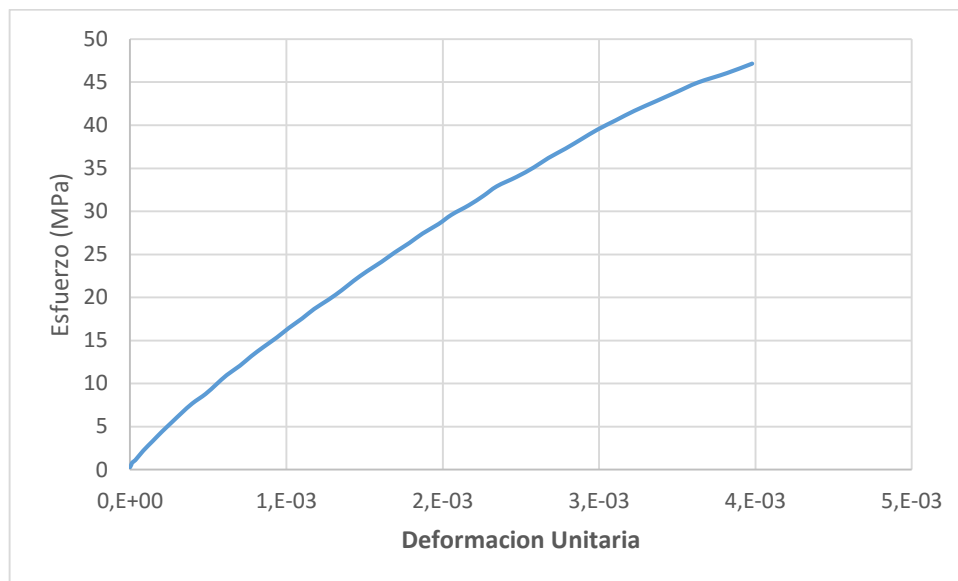


Figura E5. Representación gráfica de los resultados para el espécimen PC-1504E9

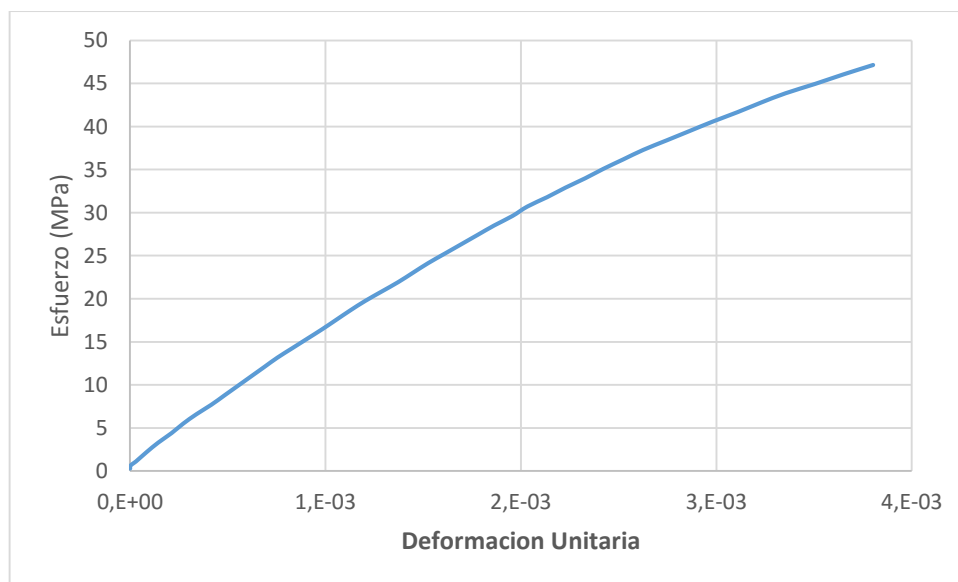


Figura E6. Representación gráfica de los resultados para el espécimen TPC-1504E9

Anexo E. Caracterización de los materiales

Tabla E1. Granulometría agregado fino

TAMIZ	TAMIZ(mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	% PASA
4	4.75	43.5	4.35	4.35	95.65
8	2.36	85.6	8.56	12.91	87.09
16	1.18	180	18	30.91	69.09
30	0.6	353	35.3	66.21	33.79
50	0.3	177.3	17.73	83.94	16.06
100	0.15	119.2	11.92	95.86	4.14
FONDO		41.4	4.14	100	0
TOTAL		1000	100	Peso de la Muestra 1000 gr	

Tabla E2. Granulometría agregado grueso:

TAMIZ	TAMIZ(mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	% PASA
11/2	37.5				
1	25				
3/4	19	518	7.40	7.40	92.60
1/2	12.5	2475	35.36	42.76	57.24
3/8	9.5	1241	17.73	60.49	39.51
#4	4.75	2766	39.51	100.00	0.00
FONDO					
TOTAL		7000	100	Peso de la Muestra 7000 gr	

Tabla E3. Resumen de los ensayos granulométricos para agregados fino y grueso:

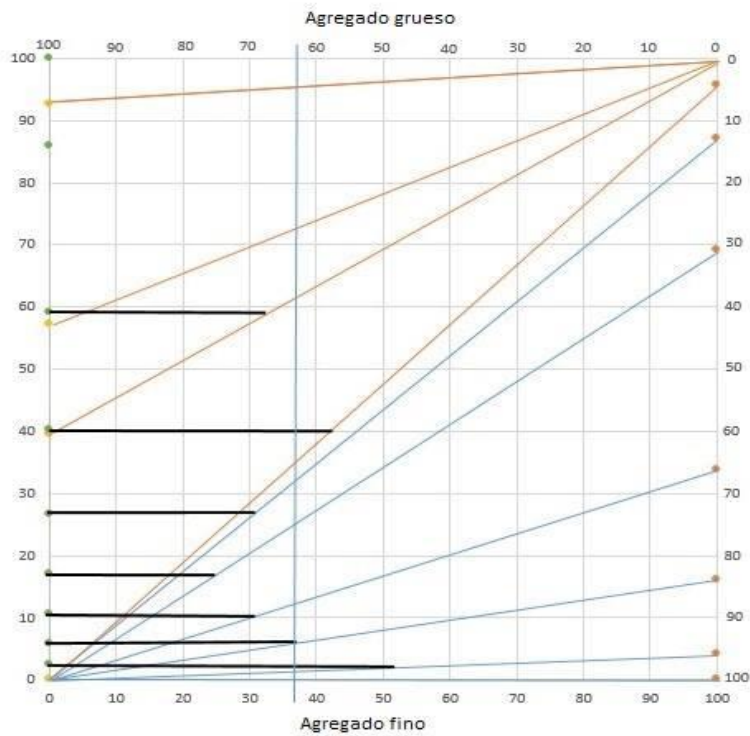
ENSAYO FISICOS DE LOS AGREGADOS					
GRAVEDADES ESPECIFICAS					
	A. FINO	A. GRUESO		A. FINO	A. GRUESO
REAL	2,67	2,76	PESO UNITARIO SUELTO	1425 kg/m ³	1410 kg/m ³
APARENTE	2,58	2,7	PESO UNITARIO COMPACTO	1565 kg/m ³	1530 kg/m ³
APARENTE SSS	2,66	2,72	ABSORCION%	2%	1%
			PORCENTAJE DE VACIO	36%	36%
MATERIA ORGANICA	FINO # 2		NORMAS	NTC 77 - 127 - 92 - 237	
MODULO DE FINURA	2,86				
TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	1				

Tabla E4. Especificaciones técnicas de la resina usada.

ESPECIFICACIONES DE LA RESINA	
DESCRIPCION :	RESINA CRISTALAN 856 Es una resina poliéster ortoftálica pre acelerada, muy versátil, para aplicaciones de propósito general.
CARACTERISTICAS	Valor
Apariencia	
Viscosidad Brookfield (cps) 25° C	1500 - 2500
% solidos	68 - 72
Tiempo de gel (minutos) 25 ° C	7 - 10
Temperatura de exotérmica °C	130 - 145
Tiempo de exotérmica (minutos)	14 - 25
Densidad (g/cm3)	1,14

Porcentaje de agregados que dan la menor relación de vacíos método grafico descrito en el libro tecnología del concreto y los morteros de Diego Sánchez de Guzmán:

Figura E1. Método grafico para determinar el porcentaje de agregados.



Como se aprecia en la imagen los porcentajes con los que se trabajó el proyecto son para agregado fino 40% y agregado grueso 60 %.

Anexo F. Gráficas de ensayos adherencia entre partículas (ensayo pull-out)

Este anexo contiene las gráficas obtenidas para el ensayo de adherencia o pull-out.

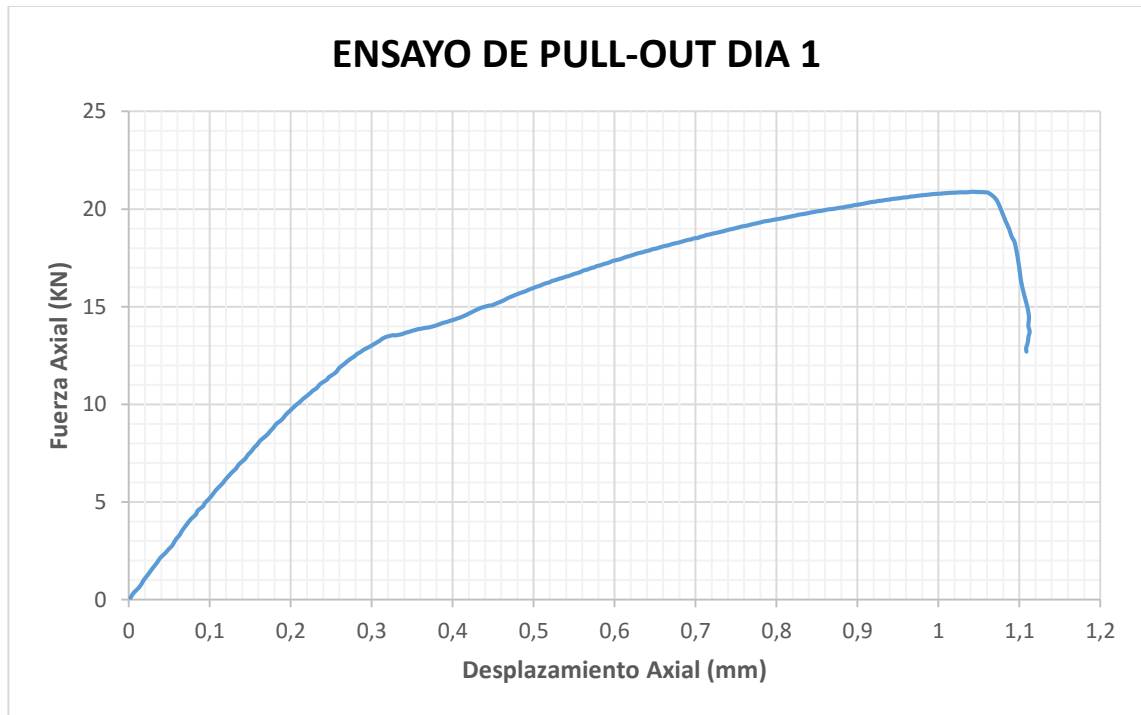


Figura F1. Grafica de resistencia a la adherencia.

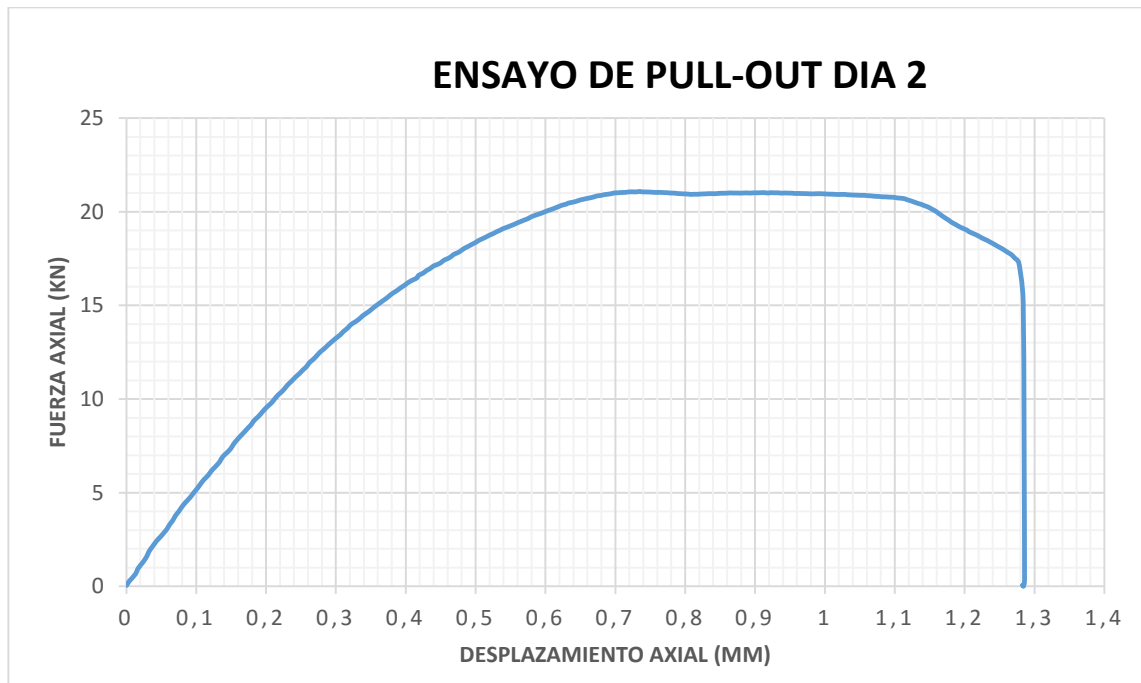


Figura F2. Grafica de resistencia a la adherencia

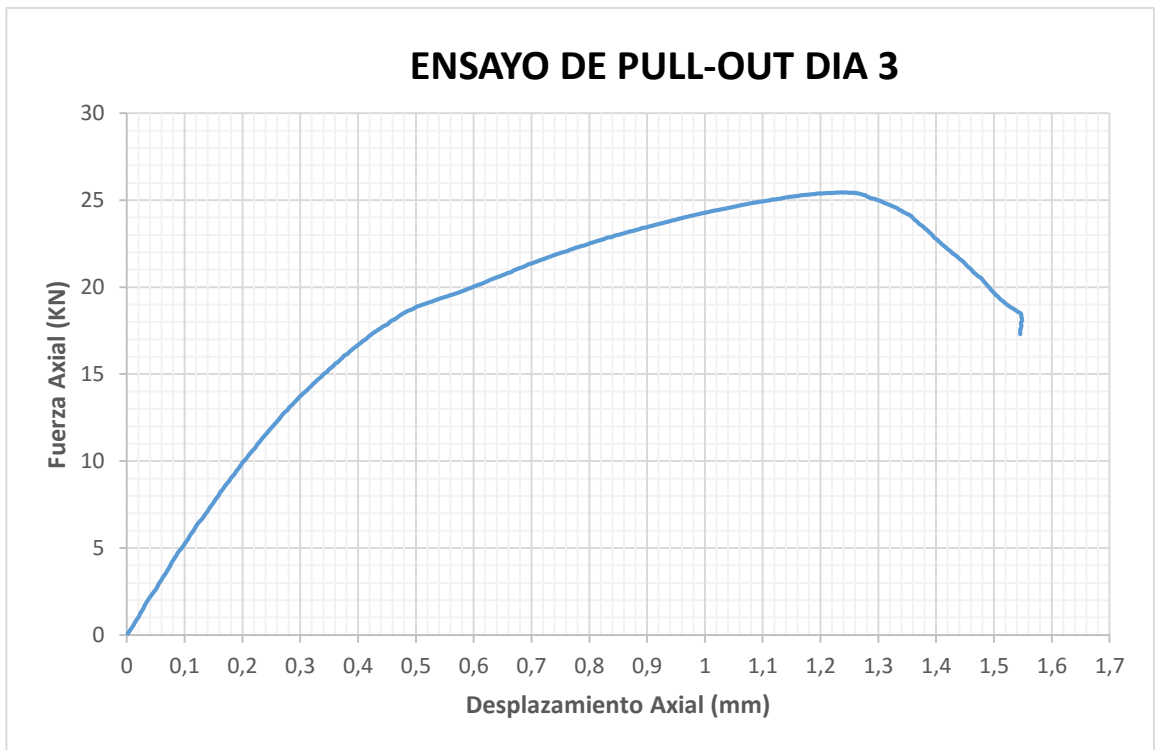


Figura F3. Grafica de resistencia a la adherencia

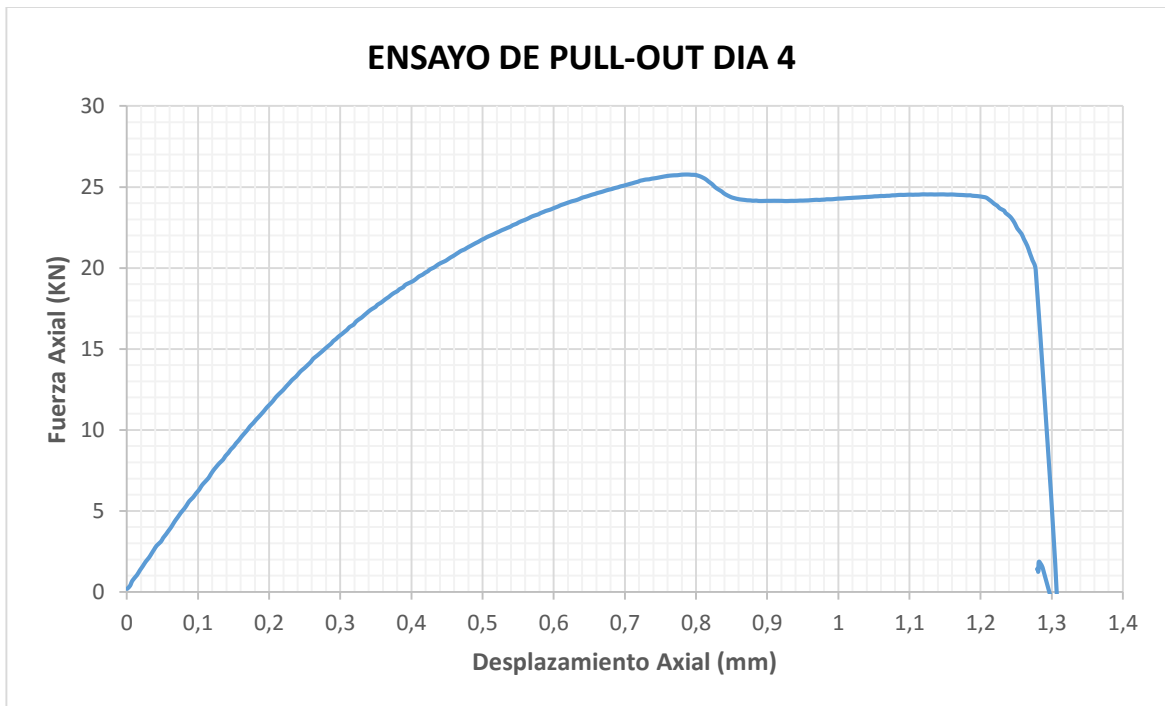


Figura F4. Grafica de resistencia a la adherencia

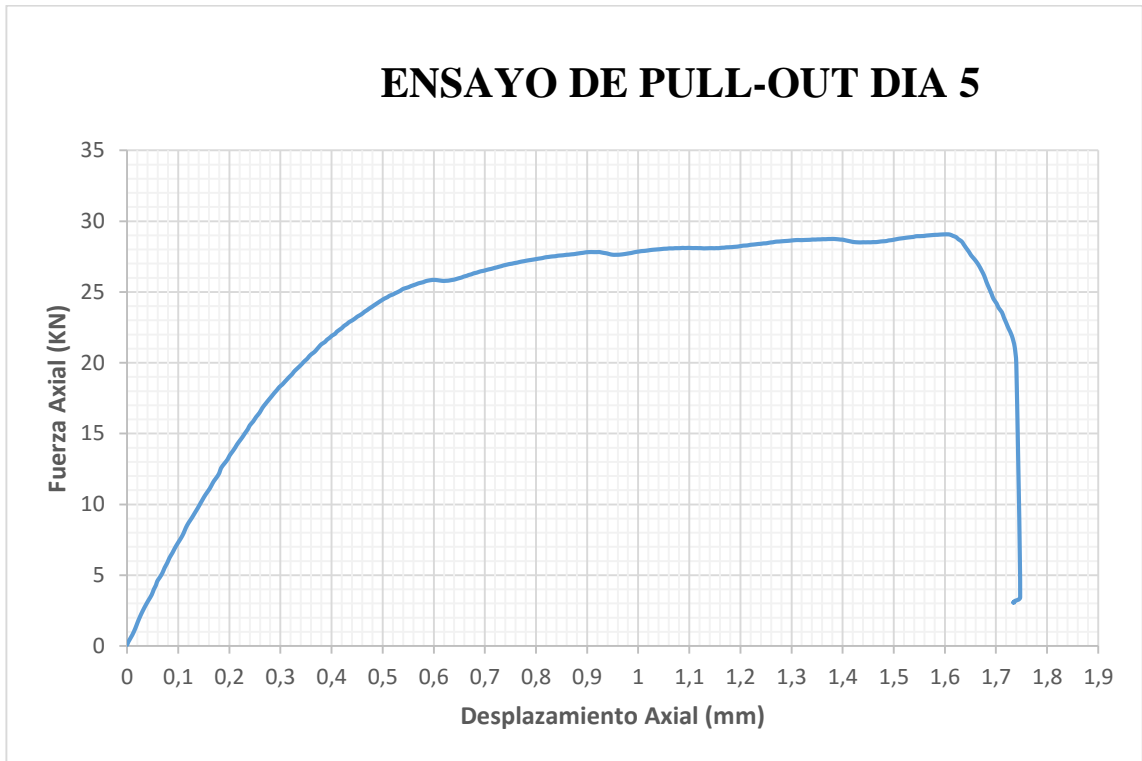


Figura F5. Grafica de resistencia a la adherencia