

## Estudio del concreto simple con agregado de caucho aplicando el MEF Study of simple concrete with rubber aggregate applying the FEM

L. A. Fernández Flores <sup>a</sup>, J. E. Cerón-Carballo <sup>a,\*</sup>, E. Pérez-Isidro <sup>a</sup>, L. G. Lizárraga-Mendiola <sup>a</sup>  
O. Caballero-Garatachea <sup>a</sup>, L. D. López-León <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

El estudio de la calidad del concreto simple se obtiene por medio de la realización de la prueba de la resistencia a la compresión ( $f_c$ ), actualmente es útil para determinar la capacidad axial, en este documento se muestran los resultados de los ensayos con probetas de cilindros fabricados con concreto simple, el objetivo de la investigación es combinar caucho que proviene de la trituración de neumático mezclándolo con el concreto. Enseguida se determinaron las funciones de contorno con la finalidad de discretizar las propiedades de calidad analíticamente y obtener los espacios muestrales aplicando el método de elementos finitos (MEF). Con los resultados de la prueba de compresión experimental se establecieron nodos de frontera. A continuación, se utilizaron funciones de interpolación, asociando la resistencia de los cilindros con la prueba de revenimiento realizada al concreto en estado fresco. Para validar se comparan los resultados del MEF con los resultados del método experimental, finalmente se realiza la simulación encontrando hallazgos de amortiguamiento con magnitudes máximas de 4.70% en concretos con una resistencia  $f_c$  de 300 kg/cm<sup>2</sup>, con revenimiento de 11.21 cm, lo que indica prevención en el desgaste desmedido del agregado grueso y disminución de fisuramiento.

*Palabras Clave:* Prensa, Concreto simple, Amortiguamiento, prueba de compresión, Revenimiento, MEF.

### Abstract

The study of the quality of simple concrete is obtained by carrying out the compressive strength test ( $f_c$ ), currently it is useful to determine the axial capacity, this document shows the results of the tests with cylinder specimens made with simple concrete, the objective of the research is to combine rubber that comes from tire shredding by mixing it with concrete. The boundary functions were then determined in order to analytically discretize the quality properties and obtain the sample spaces by applying the finite element method (FEM). With the results of the experimental compression test, boundary nodes were established. Next, interpolation functions were used, associating the resistance of the cylinders with the slump test carried out on the concrete in the fresh state. To validate, the results of the FEM are compared with the results of the experimental method, finally the simulation is carried out, finding damping findings with maximum magnitudes of 4.70% in concrete with a resistance  $f_c$  of 300 kg/cm<sup>2</sup>, with slump of 11.21 cm, which indicates prevention of excessive wear of the coarse aggregate and reduction of cracking.

*Keywords:* Press, Plain concrete, Damping, compression test, Slump, FEM.

## 1. Introducción

La prueba de consistencia y de resistencia realizada a la mezcla del concreto simple en estado fresco y endurecido respectivamente sirven en la actualidad para comprobar la calidad de su fabricación.

El estudio de los materiales básicamente consiste en determinar cuál es la reacción que experimentan los mismos cuando son sometidos a esfuerzos externos.

El estudio de calidad del concreto simple en este documento se determina cuando es sometido a dos pruebas; determinando la magnitud del revenimiento en estado fresco y utilizando especímenes de concreto endurecido, por lo tanto, la geometría del cuerpo del concreto lo integra un conjunto de materiales seleccionados, con la finalidad de formar una mezcla de calidad óptima para lograr los contactos directos de las cargas impuestas y transmitir las a las fibras internas distribuyéndolas uniformemente, (Briceño, 2020).

\*Autor para la correspondencia: [jesus\\_ceronc@uaeh.edu.mx](mailto:jesus_ceronc@uaeh.edu.mx)

**Correo electrónico:** [fe340473@uaeh.edu.mx](mailto:fe340473@uaeh.edu.mx) (Lenin Alfonso Fernández-Flores), [jesus\\_ceronc@uaeh.edu.mx](mailto:jesus_ceronc@uaeh.edu.mx) (Jesús Emmanuel Cerón-Carballo), [eber\\_perez@uaeh.edu.mx](mailto:eber_perez@uaeh.edu.mx) (Eber Pérez-Isidro), [mendiola@uaeh.edu.mx](mailto:mendiola@uaeh.edu.mx) (Liliana Guadalupe Lizárraga-Mendiola), [omar\\_caballero@uaeh.edu.mx](mailto:omar_caballero@uaeh.edu.mx) (Omar Caballero-Garatachea), [luis\\_lopez@uaeh.edu.mx](mailto:luis_lopez@uaeh.edu.mx) (Luis Daimir López-León).

### 1.1. Concreto simple [Cs]

Es el concreto elaborado con una mezcla de arena, grava, cemento y agua, cuya masa volumétrica, en estado fresco, está comprendida entre dos mil doscientos (2200) y dos mil cuatrocientos (2400) kilogramos por metro cúbico, el cuidado de la calidad de fabricación de la mezcla depende de la calidad de los materiales y el proporcionamiento de los materiales indica la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) de la mezcla. la Tabla 1. muestra la cantidad de materiales a mezclar para lograr una resistencia a la compresión de diseño, utilizando como base de inicio a la utilización de un bulto de cemento de 50 kg de peso, (Riddell, 2020).

**Tabla 1:** Proporcionamiento del Cs respecto a su resistencia a la Compresión  $f'_c$  (kg/cm<sup>2</sup>)

Materiales	50	100	150	200	250	300
Arena [Wa] (kg)	191.9	169.7	130.5	104.4	78.3	61.3
Grava [Wg] (kg)	175.6	144.6	118.8	103.3	82.6	72.3
Agua [Ww] (kg)	34.9	29.7	26.0	22.3	20.0	14.8
Cemento [Wc] (Kg)	50	50	50	50	50	50

### 1.2. Prueba de Revenimiento [R]

El revenimiento es la primera prueba de calidad que se le practica a un concreto en estado fresco, consiste en verter concreto en un cono cilíndrico metálico de 30 cm de altura, la base mide 20cm y la corona del cono mide 10cm.

En este documento se analizan los valores de la prueba de revenimiento entre cinco y diez centímetros y pueden alcanzar valores máximos de 12.5 cm. y no menores de 5 cm.

### 1.3. Prueba de Compresión [C]

Esta prueba permite determinar la resistencia a la compresión simple del concreto hidráulico, dicho esto, esta prueba permite evaluar la integridad y seguridad de los materiales utilizados en la fabricación de cilindros de concreto, así mismo, se evalúa la combinación de los componentes o productos mezclados para fabricar el concreto, durante varios tiempos de consolidación del proceso de fabricación, por lo tanto, las aplicaciones potenciales de esta prueba muestra expectativas amplias para identificar concretos fabricados a una edad determinada o para solucionar fallas derivadas de concretos dañados por agentes extraños, (Ortiz, 2020).

La prueba consiste en construir un espécimen de concreto simple, vertiendo el concreto en estado fresco en un molde, posteriormente el espécimen se desmolda y se mide comparando la altura y diámetro con la norma, con aproximación a 1 mm., (Turcios, 2020).

### 1.5. Método de elemento finito.

El cilindro utilizado en esta investigación tiene un diámetro de 10 cm y una altura de 20 cm. Para efectos de medir el diámetro se utiliza el compás de punta. También se registra la masa del espécimen. Se realiza la prueba al cilindro con una edad de 28 días de edad, por consiguiente, mientras llegan a la edad de proyecto y con la finalidad de cumplir con la resistencia a la compresión de diseño se introducen a un proceso de curado por inmersión en agua para evitar deshidratación de la mezcla, (Arana, 2018).

### 1.4. Fibras de Neumático ( $T_N$ )

El producto de trituración de neumático [ $T_N$ ] es conseguido a través de la molienda de neumático en desuso, del cual primero se extraen los hilos de alambre y después se pasa a un molino para su descomposición en elementos con tamaños en grosor menor a 5 milímetros y longitud menor a dos centímetros, considerando que los tamaños máximos del agregado grueso son de dos centímetros promedio como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1:** Producto de trituración de neumático.  
Elaboración propia

El uso de caucho producto de neumático, es un proceso que se utiliza en la construcción que ha dado resultados en temas como disminución de extracción de áridos, que igualmente produce una contaminación ambiental, por consiguiente, cumple con aspectos mecánicos y físicos con el objeto de minimizar fallas que se pueden presentar, como fracturas, deformaciones o desintegración de materiales. Estas mismas fallas se pueden evaluar al tener una comparación de las fibras de neumático triturado y su combinación en concretos hidráulicos, (Briceño, 2020).

El Método de elemento finito [MEF] consiste en determinar las condiciones de frontera de la geometría en el

área de estudio (Cerón, 2020), para dar solución y determinar las incógnitas por medio de las funciones de interpolación, además, se utiliza para calcular el amortiguamiento debido a la incorporación de fibras de caucho al concreto simple tradicional y modificado, (Riddell, 2020).

La aplicación del [MEF] en los problemas relacionados con ingeniería (Briceño, 2020), es a menudo singular, puesto que la definición del dominio del estudio corresponde con vértices interiores al objeto de estudio.

Teniendo esto en cuenta, una de las contribuciones de análisis de resultados del presente trabajo es la aplicación del MEF, que permite determinar discretizaciones para los subdominios mediante un código, utilizando la generación de mallas nodales en las interfaces de campo para lograr transferir la solución de un límite de subdominio a su vecino (Arana, 2018), así como para rastrear la solución de sus límites. Estos algoritmos se heredan y se basan en la búsqueda proyectada rápida del vecino más cercano y la formulación conservadora residual ponderada con la cuadratura numérica, (Pantoja, 2019).

Por lo tanto, en este trabajo se realiza una comparación en el diseño de un “Cs” por medio del método tradicional y un “Cm” respecto a una interfaz Lagrangeana por medio del MEF. Lo anterior permitirá incrementar las variables de análisis con las cuales se diseñan los elementos base de un concreto, (Turcios, 2020).

## 2. Materiales y Métodos.

La metodología propuesta parte del estudio de calidad del concreto simple utilizando fibras de caucho, por consiguiente, en la investigación se utiliza un control del proporcionamiento de la mezcla de concreto, el cual consiste en tres pasos los cuales son:

1. El diseño del sistema de utilización de fibras de caucho, incluyendo una introducción.
2. El segundo consistente en mostrar el proceso analítico considerando el control de las pruebas de revenimiento y de resistencia a la compresión, y
3. El tercero consiste en aplicar el método de evaluación de la compresión del concreto en estado endurecido y determinar las variables con el MEF.

La resistencia a la compresión se controla derivando el proporcionamiento de la mezcla incorporando fibras de caucho previo a realizar la prueba mecánica, el proporcionamiento de la mezcla se desarrollada por medio del método del peso de la muestra, esto se logra utilizando el cribado del agregado por

medio de la aplicación de la norma NMX-C-160-ONNCCE-2004.

### 2.1. Proporcionamiento de la mezcla.

La elaboración de la mezcla de concreto simple en la presente investigación se elabora incluyendo los materiales mostrados en la Tabla 1, además, se agregó caucho, se observó que la prueba de calidad de revenimiento sobrepasaba los estándares normativos encontrando valores superiores a los 15 cm., (Pantoja, 2019).

Cuando se agregaba caucho en porcentajes mayores a 25%, por esa situación se tomó la decisión de utilizar porcentajes menores, posterior se elaboró concreto para rellenar tres moldes cilíndricos de metal con diámetro de 10 cm y altura de 20 cm, en todas y cada uno de los proporcionamientos mostrados en la Tabla 1.

Cada espécimen de concreto simple se desmolda a las 24 horas, se tomó el peso en promedio 4.52 kg, se realizaron los ensayos a 28 días y las magnitudes de extremo en esta investigación sirvieron para calibrar el MEF.

### 2.2. Diseño del sistema de fibras de caucho ( $T_N$ )

El diseño del sistema de utilización de fibras de caucho ( $T_N$ ), se realiza considerando seis porcentajes de la mezcla del Cs, es decir, se adiciona fibras de caucho a la mezcla tomando como base de cálculo los valores del peso, (Hernández, 2023).

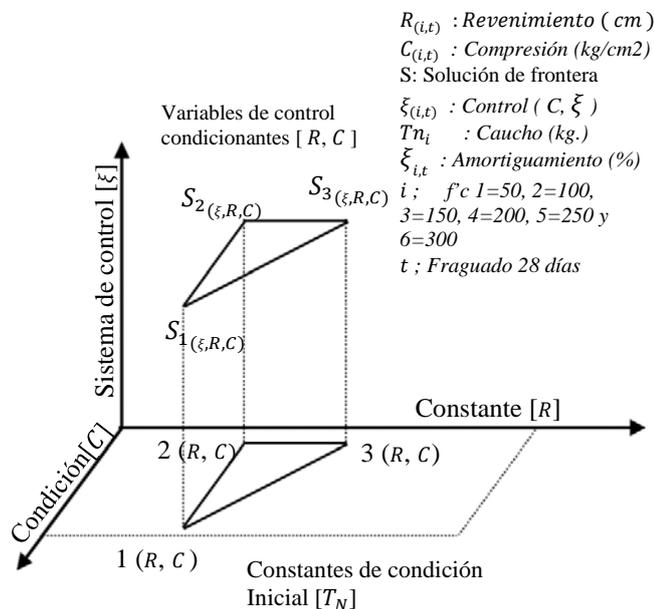
### 2.3. Esquema matemático

La característica del sistema de evaluación del concreto modificado considera seis valores correspondientes a agregar en cada uno de ellos un porcentaje de fibras de caucho y aplicar la prueba de compresión (Plati, 2019).

El esquema muestra tres características principales para la evaluación de la calidad del concreto:

- La primera es la constante debida a la normativa, se nombra constante porque es debida a una prueba inherente del revenimiento en la fabricación del concreto.
- La segunda es la condición, esta se debe a que el concreto contara con una resistencia a la compresión normada y por último;
- El sistema de control, este se debe a la magnitud de la prueba de resistencia a la compresión, en consecuencia, dicha resistencia puede tener valores comenzando desde los mínimos permitidos para concretos hasta los máximos convencionales, (Arana, 2018).

El sistema consiste en determinar el amortiguamiento utilizando la constante y la condición inicial en seis puntos de control experimentalmente por medio de la prueba de compresión en una prensa y analíticamente por medio del método de elemento finito, como se observa en la **Figura 2**.



**Figura 2:** Esquema matemático del Modelo. Elaboración propia

2.4. Formulación matricial

El “Cs” se determina con la Ecuación 1 y está formado por la combinación de arena [Wa], grava [Wg], agua [Ww] y cemento [Wc].

$$C_s = W_a + W_g + W_w + W_c \quad (1)$$

La Ecuación 2 determina la elaboración del producto convencional de concreto simple [Pc], este se fabrica utilizando el método tradicional de elaboración de concreto simple con proporcionamiento a base de los materiales utilizando el peso como unidad de medida para mezclarlos y alcanzar una resistencia a la compresión de diseño, y está formado por la combinación de concreto simple [Cs], fibra de caucho proveniente de triturado de neumático [TN] y su característica debida al amortiguamiento de la mezcla [ $\xi$ ].

$$P_c |_{(i,t)}^{(u,n)} = C_s |_{(i,t)}^{(u,n)} + T_N |_{(i,t)}^{(u,n)} + \xi |_{(i,t)}^{(u,n)} \quad (2)$$

Así mismo, posterior a realizar la prueba de resistencia a la compresión se genera una matriz de base de datos utilizando la Ecuación 2, en consecuencia, se genera una discretización inicial para determinar las fronteras de estudio y poder determinar los subdominios mediante un código utilizando la Ecuación 3.

$$N_i^{(e)} = \frac{1}{2A_e} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (3)$$

$$N_i(x, y) \xi_i = N_1 C_1 + N_2 R_1 + N_3 \xi_1 \quad (4)$$

$$\xi_{(i,t)} = N_1 C_{(i,t)} + N_2 R_{(i,t)} + N_3 \xi_{(i,t)} \quad (5)$$

Donde:

- $N_i^{(e)}$ : Representa las funciones de forma.
- $A_e$ : Representa la superficie del espacio muestral.
- a, b, c: Son las constantes de la geometría triangular.
- $N_1, N_2, N_3$ : Son las funciones de contorno para interpolar.
- $C_{(i,t)}$   
 $R_{(i,t)}$  y  
 $\xi_{(i,t)}$ : Son los datos de la prueba de compresión [C], Revenimiento [R] y Amortiguamiento [ $\xi$ ].
- $\xi_u$ : Representa el valor interpolado del MEF.

La Ecuación 4 y la Ecuación 5 son complementarias a la Ecuación 3, en su conjunto muestran la aplicación del método de elementos finitos en el proceso de la investigación.

El amortiguamiento en los puntos de control se determina con la Ecuación 2, además, por medio de la Ecuación 3 se determina el amortiguamiento en treinta y seis valores de la magnitud del revenimiento del Cm, esto se realiza para conocer el amortiguamiento por medio del método de Lagrange en elemento finito, (Cerón, 2022).

Para la evaluación del sistema se realizó por medio de la identificación de la muestra. Se utiliza las variables de revenimiento determinado con datos de la mezcla con producto triturado de neumático (Tn=0%, Tn=5% , Tn=10% , Tn=15% , Tn=20% y Tn=25%) [kg], (Cortés, 2024).

La comparación del valor de la resistencia a la compresión y del amortiguamiento, incorporando el valor del revenimiento en todos y en cada una de las treinta y seis pruebas realizadas se realiza controlando el valor de diseño ( $f'c=50, 100, 150, 200, 250$  y  $300$  kg/cm2).

La relacionoon del revenimiento y la resistencia a la compresión crea el vector de condición [  $\varphi_{(i,t)}$  ], lo que asegura que el proporcionamiento de caucho permanezca constante y finalmente la prueba de calidad condiciona el sistema de control [  $S ; Control ( T_n, \xi )$  ], por consiguiente, genera una alternativa de solución, asi como se realiza en (Jamshidi, 2019).

### 3. Resultados

El resultado de la prueba de compresión, utilizando la máquina Pilot genera información del número de cilindro ensayado como se observa en la Figura 3.



**Figura 3:** Resultado de la prueba de compresión. Elaboración propia

El revenimiento del concreto en estado fresco cumple con una correspondencia directa con la resistencia a la compresión del concreto simple tradicional, por consiguiente, de la misma forma corresponde con el concreto modificado (Jae, 2019).

#### 3.1. Muestra experimental de compresión.

La medición se llevó a cabo con datos de la muestra de los cilindros de concreto simple y concreto modificado, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Resultado de la prueba de compresión [kg/cm2.]

Tn %	Resistencia a la compresión $f'c$					
	50	100	150	200	250	300
( 0 % )	49.22	98.45	147.67	196.90	246.12	295.35
( 5 % )	46.20	92.40	140.78	184.80	231.00	277.20
( 10 % )	42.54	85.09	138.13	170.18	212.72	255.26
( 15 % )	35.48	70.96	125.09	141.91	177.39	212.87
( 20 % )	27.72	55.44	117.20	110.88	138.60	166.31
( 25 % )	20.53	41.06	111.11	82.13	102.66	123.19

Se realizaron toma de lecturas de resistencias a la compresión considerando seis valores de porcentaje de las fibras de neumático [T<sub>N</sub>], estos valores se consideran como datos para incluirlos en las condiciones de frontera en el análisis del experimento, bajo la norma de la SCT, los datos experimentales son mostrados en los recuadros de color negro, el resto son determinados con el método MEF, (Pantoja, 2019).

#### 3.2. Procesamiento de información

El procesamiento se realiza en tres etapas:

- En la primera se identifican los valores del revenimiento considerando el valor de la fibra de caucho incorporado al concreto simple.
- En la segunda etapa se realiza el análisis de las variables condicionantes, por lo tanto, se identifican los valores de la resistencia a la compresión que ocupa el sistema de control y
- En la tercera etapa, se identifica el revenimiento del sistema de control, en las tres etapas se utiliza la Ecuación 3, para determinar el amortiguamiento despejándolo de la Ecuación 2.

Las funciones de forma se generan a partir de la variable de la resistencia a la compresión y la condición del revenimiento, las magnitudes de ambas variables forman la frontera de análisis y procesamiento de información (Cerón, 2020).

La Tabla 3 muestra la solución de frontera para  $S_{1(\xi,R,C)}$  se determina de forma experimental el amortiguamiento utilizando la Ecuación 2, tomando como datos la resistencia a la compresión y el revenimiento, (Ortiz, 2020).

**Tabla 3:** Funciones de forma del amortiguamiento de la compresión [%]

TN	$f_c$	$f_c$	$f_c$	$f_c$	$f_c$	$f_c$
%	50	100	150	200	250	300
0 %	0.078	0.155	0.233	0.310	0.388	0.465
5 %	0.302	0.605	0.689	1.210	1.512	1.815
10 %	0.366	0.731	0.265	1.462	1.828	2.193
15 %	0.707	1.413	1.304	2.826	3.533	4.240
20 %	0.776	1.552	0.789	3.104	3.879	4.655
25 %	0.719	1.437	0.609	2.875	3.593	4.312

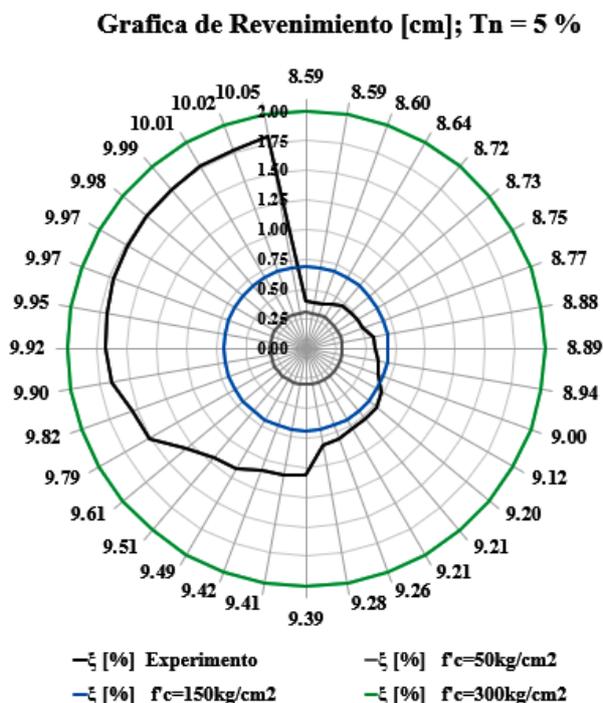
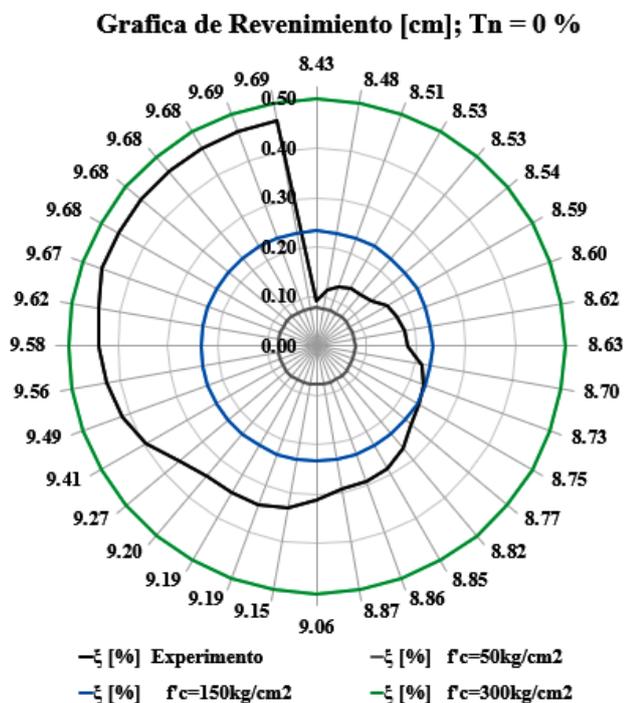
Los sistemas de ecuaciones de las funciones de forma describen el comportamiento de un vector de variables endógenas en función de un vector de variables exógenas. Los regresores estocásticos surgen del hecho de que la variable endógena de la ecuación puede entrar en otra como variable explicativa. Esto sucede al determinar los valores de control. Se realizó primeramente las funciones de forma del concreto modificado con el objetivo de analizar su calidad, en cada caso se utilizó un porcentaje en peso de adición de fibras de caucho(Ortega, 2018).

Se observó que el valor del revenimiento disminuye en correspondencia al incremento de la resistencia a la compresión, sin embargo, la variable de la resistencia a la compresión se identifica como independiente del revenimiento y de la resistencia a la compresión, las muestras ensayadas se observan en la Figura 4, (Plati, 2019).



**Figura 4:** Resultado de la prueba de compresión. Elaboración propia

El análisis de los datos determinados del análisis del estudio, son procesados y con esta información se calcula el amortiguamiento, incorporando para este fin a la Ecuación 3, con ello se genera la Figura 5.



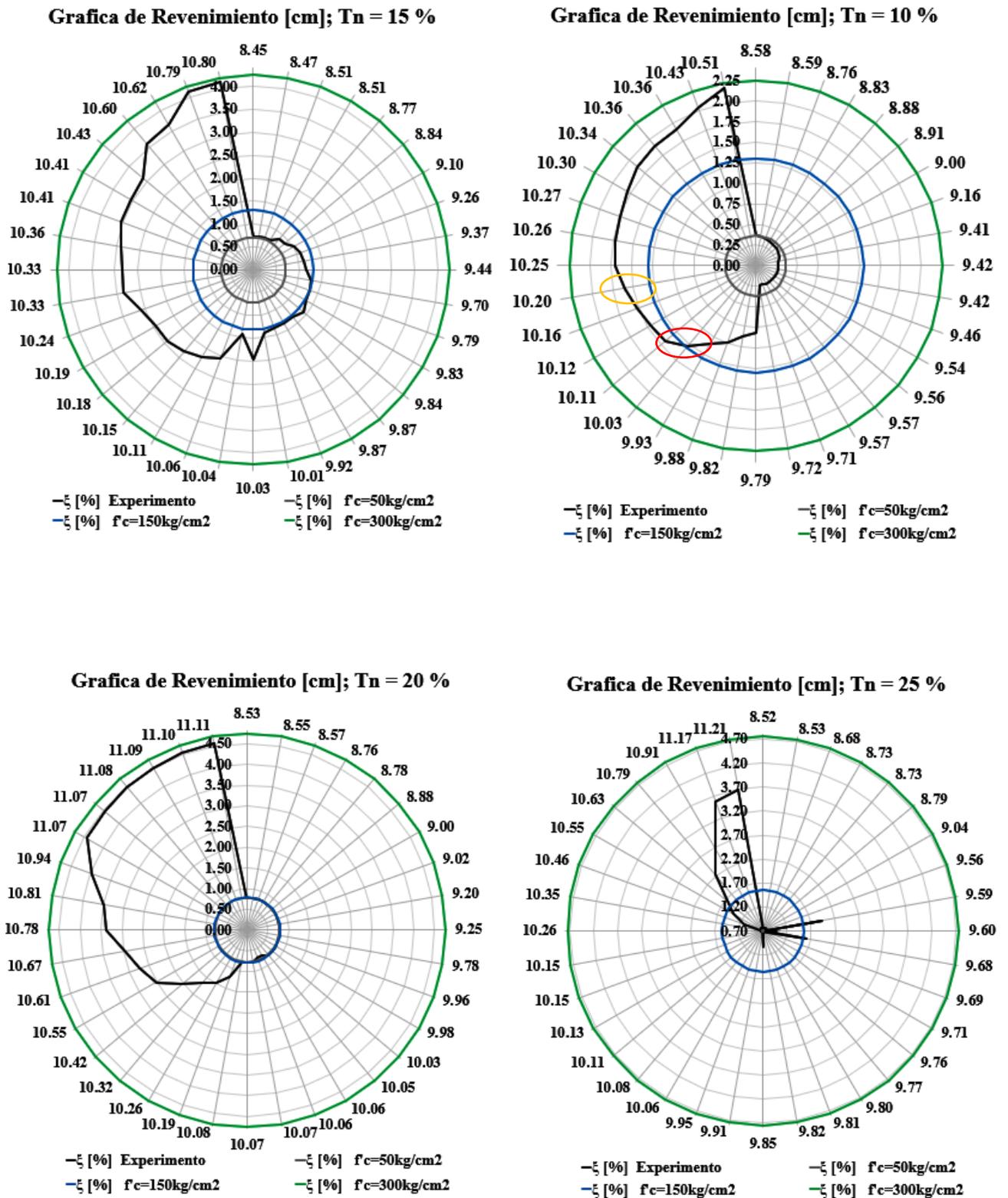


Figura 5: Representación gráfica del estudio de calidad de concreto modificado con Tn= 0, 5, 10, 15, 20 y 25% del peso del Cs. Elaboración propia

#### 4. Análisis

Para la comparativa de la etapa condicionante se toma en consideración la incorporación de la fibra de caucho constante en el diseño de la mezcla de concreto simple modificado, el revenimiento de diseño del sistema condicionante y la determinación del amortiguamiento diseñado del sistema de control.

##### 4.1. Gráfica de amortiguamiento

La información que muestra la Tabla 3, es representativa y da solución al revenimiento, cumpliendo una correspondencia directa, este dato sirve para realizar el análisis de solución, para ingresar a la gráfica correspondiente a dicho amortiguamiento (Wang, 2016). Para la comparativa de la etapa de control del sistema, se construye la simulación de las tres etapas utilizando las variables determinadas con la Ecuación 2.

Se utiliza la Ecuación 3 para determinar la simulación del amortiguamiento con el uso de las variables de la resistencia a la compresión y el revenimiento determinado con datos de la mezcla incorporando  $T_n=0, 5, 10, 15, 20$  y  $25 \%$ , (SCT, 2015), como se observa en la Figura 5. Se utiliza las variables de la resistencia a la compresión y el revenimiento determinado con datos de la mezcla incorporando caucho en una proporción de  $T_n=5 \%$ , como se observa en la Figura 3.

Se observa que la problemática a resolver a partir de la adición de caucho en diferentes proporciones en peso es importante para identificar el amortiguamiento del concreto simple modificado. Aunado a ello, se observa en este apartado se determina dicho amortiguamiento a partir de la recopilación de resultados de la prueba de revenimiento y de la resistencia a la compresión, en consecuencia, estos determinan los factores que conllevan a un concreto óptimo, así como de su adición de caucho.

Se describe en esta investigación la forma fehaciente del procedimiento utilizado en la metodología descrita para la determinación de los parámetros medibles en cada ensayo, en respuesta a los resultados encontrados, se observa como hallazgo importante que los cilindros muestran respuesta como la encontrada en la literatura, en relación a la prueba de compresión, así mismo, en la prueba de revenimiento aplicada a la prueba del concreto en estado físico, dicha información se gráfica y se muestra en la Figura 5.

Dicho lo anterior, los resultados de la prueba de resistencia a la compresión obtenidos a partir de utilizar cargas con velocidad constante, lo que denota que el resultado es verdadero, por lo tanto, se omitió el cuestionamiento de calibrado de equipo de ensaye, (Capuñay, 2019).

#### 5. Discusión

##### 5.1. Evaluación Diagnostica

Se realiza una evaluación diagnostica con la finalidad de tener claridad en el aporte de la presente investigación, y resaltar los hallazgos mostrados de los factores observados en la Figura 5.

La normativa aplicable se desarrolla cuando los resultados obtenidos de especímenes cilíndricos indiquen baja resistencia del concreto o porque existan evidencias de un mal acomodo o de curado, se deberá evaluar la resistencia mediante núcleos extraídos de la zona en donde fue colocado el concreto en duda.

Los resultados obtenidos de la prueba de compresión son aceptados, sin embargo, las magnitudes se encuentran disminuidas por la adición de fibras de caucho, luego entonces, el promedio de estos y de acuerdo con la normatividad de Calidad del Concreto Hidráulico, N·CMT·2·02·005/04, en el apartado (D.4. Resistencia):

*D.4.4. Cuando los resultados obtenidos de especímenes cilíndricos indiquen baja resistencia del concreto o porque existan evidencias de un mal acomodo o de curado, se deberá evaluar la resistencia mediante núcleos extraídos de la zona en donde fue colocado el concreto en duda. Por cada zona se probarán tres núcleos, el promedio de estos no será menor del ochenta y cinco (85) por ciento de la resistencia de proyecto ( $f'c$ ) y ningún valor será menor del setenta y cinco (75) por ciento de la de proyecto.*

La reglamentación refiere a los resultados en especímenes con evidencia de mal acomodo utilizando el promedio de estos no será menor del ochenta y cinco (85) por ciento de la resistencia de proyecto ( $f'c=150 \text{ kg/cm}^2$ ) y ningún valor será menor del setenta y cinco (75) por ciento de la de proyecto, con esta información se genera la Tabla 4.

**Tabla 4:** Valores permitidos en la prueba de compresión, Norma N-CMT-2-02-005-04.

	Resistencia a la compresión [ $\text{kg/cm}^2$ ]					
( 115 % )	60	118	175	233	290	348
( 110 % )	58	115	173	230	288	345
( 105 % )	53	105	158	210	263	315
( 100 % )	50	100	150	200	250	300
( 95% )	48	95	143	190	238	285
( 90% )	45	90	135	180	225	270
( 85% )	43	85	128	170	213	255

La Figura 5 muestra el estudio de calidad; se observa un avance de aumento de su vida útil al descubrir el hallazgo de un incremento del amortiguamiento con valores máximos de 1.25% al incorporar 10% de fibra de caucho con valores similares al 85% de la resistencia a la compresión de diseño, con un revenimiento de 10 cm. (Lu, 2015).

Dicho lo anterior, del mismo modo se pueden utilizar las gráficas para desarrollar diseño con adición de fibras de caucho y poder saber la magnitud de la resistencia a la compresión.

Por consiguiente, la resistencia a la compresión determinada para dar seguimiento a la construcción utilizando concreto simple modificado con un producto convencional de incorporación en proporción de peso de fibras de caucho, consecuentemente se utiliza la Tabla 2 y se compara con los valores obtenidos del experimento mostrados en la Tabla 4, por lo tanto, se designa un material convencional incorporando caucho al 10%, se muestra con un círculo rojo los valores, (Turcios, 2020).

### 5.2. Aplicabilidad

Si se realiza una pavimentación con concreto simple, en donde se requiere mantener la resistencia a la compresión mínima al 90% del  $f'c$  de proyecto (200 kg/cm<sup>2</sup>), se determina:

- El porcentaje de fibra de caucho máxima recomendable.
- El revenimiento óptimo y
- La durabilidad máxima respecto al amortiguamiento determinado.

Instrumentos de evaluación: Tabla 2 y Figura 5.

Datos:

$f'c$  de proyecto (200 kg/cm<sup>2</sup>);  $F'c$  mínima = 90% (200) = 180 kg/cm<sup>2</sup>;

Solución:

- En la Tabla 2, se ingresa con el  $f'c$  mínimo y se obtiene El valor 184.80, correspondiente al 10% de fibra de caucho.
- Se ingresa a la Figura 5 con el valor  $f'c=200$  kg/cm<sup>2</sup> y  $T_N=10\%$ ; se obtiene que el revenimiento de 10.20 cm.
- Se ingresa a la Figura 5 con los datos del inciso b), se encuentra el valor de  $\xi = 1.325\%$  se marca en color anaranjado.

Por consiguiente, la resistencia a la compresión es determinada en primer lugar con los resultados de las pruebas experimentales y el resto con las aproximaciones del método de elementos finitos, los resultados permiten evaluar el comportamiento de la elaboración del concreto modificado.

## 6. Conclusiones

En este trabajo de investigación se realizó el diseño del sistema de incorporación de fibras de producto triturado de neumático aplicando el método de control del estudio de calidad con el ensayo de la resistencia a la compresión utilizado para fabricar concreto simple tradicional y para fabricar concreto simple modificado agregando fibras de caucho.

El análisis del concreto simple modificado se logra aplicando la evaluación diagnóstica con una adición de caucho en proporción al peso del concreto, utilizando como constantes de proyecto de investigación el proporcionamiento de los elementos que conforman el concreto tradicional para lograr una resistencia a la compresión de diseño con una temporalidad de 28 días, en consecuencia, se incrementa el módulo de elasticidad del concreto tradicional logrando crear un producto convencional, disminuyendo la resistencia a la compresión al mínimo, esto se logró utilizando los datos históricos de treinta y seis pruebas realizadas.

Primeramente, se tomaron los datos experimentales de la frontera de la muestra, posterior utilizando los datos experimentales de los valores utilizando la resistencia a la compresión de 150 kg/cm<sup>2</sup>, comparando estos seis valores experimentales con los valores analíticos del proceso del método de MEF se comprobó que los resultados tienen una variación aceptable de 98.5%, por consiguiente, se procedió a realizar la obtención de los valores internos.

La obtención de resultados implementando la metodología concluye con las ventajas siguientes:

- El diseño del sistema incrementando la fibra de caucho en la prueba de resistencia a la compresión utilizando como base de análisis el concreto modificado en proporcionamiento de  $f'c=150$  kg/cm<sup>2</sup> se decreta el esfuerzo de compresión alcanzando un valor del 138.13 kg/cm<sup>2</sup>
- El revenimiento utilizado como sistema de control permanece uniforme teniendo una variación del 8.02% del concreto simple tradicional respecto al concreto simple modificado.
- El amortiguamiento controlado bajo el esquema de las variables aleatorias de la resistencia a la compresión y del revenimiento permanece con valores reducidos con una magnitud máxima del 13.73% respecto del  $C_s$  correspondiente al  $P_c$ .

El amortiguamiento obtenido aplicando la metodología descrita en esta investigación, se observa que se comprueba la modificación del módulo de elasticidad como resultado de la representación de las seis gráficas, por consiguiente, se selecciona la resistencia de compresión óptima de 138.13 kg/cm<sup>2</sup> para utilizarla en un concreto convencional, con un revenimiento adecuado de 10 cm y con un proporcionamiento óptimo, esto indica prevención en el desgaste del concreto y una disminución de fisuramiento del 1.25%.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la colaboración del Grupo de Investigación Ingeniería Civil Forense, al Cuerpo Académico de Ingeniería Civil Sustentable y Tecnología de Materiales del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, a la Licenciatura de Ingeniería Civil, (ICBI), de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por su apoyo para la realización de la presente investigación.

## Referencias

- Arana, B. (2018). *Análisis Comparativo de Cimentaciones Superficiales y Uso de Geo-Sintéticos en Suelos de Baja Capacidad Portante*. 1–180. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8487>
- Briceño, J. (2020). Asentamientos en fundaciones continuas con modelos numéricos de simulación con elementos finitos Settlements in continuous foundations with numerical models of simulation with finite elements. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 41(2), 157–166.
- Capuñay, M. (2019). *Análisis Comparativo Entre Los Métodos De Equilibrio Límite, Cuña Profunda Y Software Especializado En Elementos Finitos, Para El Diseño Geotécnico De Muros Anclados, Aplicado a Ejecución De Sótanos En Lima Metropolitana*.
- Cerón, J. (2020). Cálculo de la resistencia del suelo al interpolarlo con el MEF. *Pádi*, 8(15), 7–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v8i15.4974>
- Cerón, J. (2022). Análisis de riesgo en puente peatonal tipo armadura utilizando sensores. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(18), 40–46. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i18.7354>
- Cortés, R. (2024). Estudio del desarrollo local aplicando los criterios de la agenda 2030. *Pádi*, 11(22), 144–153. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11058>
- Hao, D. (2015). CAM and SMA mixtures to delay reflective cracking on PCC pavements. *Construction and Building Materials*, 96, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.020>
- Hernández, I. (2023). *Diseño Estructural De Un Edificio De Mampostería Aplicando Las Ntc 2020*. Unam.
- Jae, S. (2019). Influence of coarse aggregate angularity on the mechanical performance of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 204, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.135>
- Jamshidi, A. (2019). State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement. *Construction and Building Materials*, 200, 713–755. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.286>
- Lu, Q. (2015). Alternate uses of epoxy asphalt on bridge decks and roadways. *Construction and Building Materials*, 78, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.125>
- Ortega, V. (2018). Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. *Construction and Building Materials*, 163, 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.121>
- Ortiz, G. (2020). Análisis De La Rigidez Dinámica Del Sistema Suelo-Cimentación De Cajones De Cimentación Mediante El Método De Elementos Finitos. *Universidad Autónoma Metropolitana*. <https://doi.org/10.24275/uama.6743.9450>
- Pantoja, D. (2019). Análisis Comparativo Entre Metodologías Analíticas Tradicionales Y De Elementos Finitos Para El Diseño Geotécnico De Cimentaciones Daniela. *Universidad De Cartagena*, 1–23.
- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials , design , and preservation strategies : A literature review. *Construction and Building Materials*, 211, 539–555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>
- Riddell, R. (2020). Diseño Estructural. *Diseño Estructural*, 12126. <https://doi.org/10.2307/j.ctv14rmd3>
- SCT. (2015). Norma carreteras pavimentos revestimientos N·CTR·CAR·1·04·001/00. SCT, 1–7.
- Turcios, A. (2020). *Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos Abstract Resumen*. 114. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12457/TFG\\_David\\_Turcios\\_Medina.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12457/TFG_David_Turcios_Medina.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Wang, Z. (2016). Utilization of magnetite tailings as aggregates in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 114, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.139>