





## Evaluación de la abrasión de la grava con agregado de caucho

### Evaluation of abrasion of gravel with rubber aggregate

Á. E. Barajas-Martínez <sup>a</sup>, J. E. Cerón-Carballo <sup>b,\*</sup>, E. Pérez-Isidro <sup>b</sup>, L. G. Lizárraga-Mendiola <sup>c</sup>,

O. Caballero-Garatachea <sup>c</sup>, L. D. López-León <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Alumno de noveno semestre, Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

<sup>b</sup> Ingeniería Civil Forense, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

<sup>c</sup> Ingeniería Civil Sustentable y Tecnología de Materiales, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

#### Resumen

La trituración de los agregados actualmente es útil como una práctica controlada en los bancos de materiales pétreos, su dureza debe proporcionar la calidad adecuada para su uso satisfactorio. En este documento se determinó la abrasión de la grava a través de ensayos en laboratorio, asociando el desgaste por abrasión con la prueba de revenimiento realizada al fabricar concreto en estado fresco, en ambos ensayos se agrega fibras de caucho en seis porcentajes de peso. Enseguida se determinaron las funciones de contorno, para discretizar el desgaste por abrasión y obtener los espacios muestrales aplicando el método de elementos finitos (MEF). Con los resultados de la prueba de abrasión en la máquina de los ángeles se establecieron nodos de frontera. A continuación, se utilizaron funciones de interpolación con la finalidad de crear simulaciones de la cantidad de fibra de caucho con los proporcionamientos de la mezcla de concreto. Para validar se comparan los resultados del MEF con la prueba experimental, finalmente se realiza la simulación encontrando hallazgos de amortiguamiento con magnitudes máximas de 4.70% en concretos con un comportamiento mecánico referente al  $f'c$  de 300 kg/cm<sup>2</sup>, con revenimiento de 11.21 cm, lo que indica prevención en el desgaste desmedido del pavimento y disminución de fisuramiento.

*Palabras Clave:* Agregado grueso, Abrasión, Amortiguamiento, prueba de los ángeles, Fricción.

#### Abstract

The crushing of aggregates is currently useful as a controlled practice in banks of stone materials; its hardness must provide adequate quality for its satisfactory use. In this document, the abrasion of gravel was determined through laboratory tests, associating wear due to abrasion with the slump test carried out when manufacturing concrete in a fresh state. In both tests, rubber fibers were added in six weight percentages. Next The boundary functions were determined to discretize abrasion wear and obtain the sample spaces by applying the finite element method (FEM). With the results of the abrasion test on the Los Angeles machine, boundary nodes were established. Next, interpolation functions were used in order to create simulations of the amount of rubber fiber with the proportions of the concrete mix. To validate the results of the FEM are compared with the experimental test, finally the simulation is carried out finding damping findings with maximum magnitudes of 4.70% in concrete with a mechanical behavior referring to the  $f'c$  of 300 kg/cm<sup>2</sup>, with slump of 11.21 cm, which indicates prevention of excessive pavement wear and reduction of cracking.

*Keywords:* Coarse aggregate, Abrasion, Damping, angel test, Friction.

#### 1. Introducción

La abrasión de los agregados gruesos, comúnmente llamados gravas, utilizados en la industria de la construcción

para fabricar concretos, provoca desgaste o pulido por la fricción en un proceso mecánico de la superficie en contacto (IDM, 2024).

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

**Correo electrónico:** [ba323287@uaeh.edu.mx](mailto:ba323287@uaeh.edu.mx) (Ángel Ezequiel Barajas-Martínez), [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).

La geometría del cuerpo del concreto formada por un conjunto de materiales seleccionados, no impide que la superficie de contacto sea desgastada por el uso propio, sin embargo, los contactos directos de las cargas impuestas son transmitidas a las fibras internas distribuyéndolas uniforme y dinámicamente. Así mismo, Este conjunto de fibras proporciona soporte y estabilidad a la superficie de contacto (V. Ortega, 2018).

La granulometría del agregado grueso en concretos rígidos es básicamente una grava triturada con tamaño máximo de 38 mm y tamaño mínimo de finos (Ghasemi, 2021), cuya resistencia por la combinación de tamaños supera a la del concreto utilizado para soportar las cargas, por otro lado, para cribar los agregados gruesos se recomienda el empleo de cribas con marcos de diferentes dimensiones para separar los granos por tamaño (Plati, 2019). El tamaño nominal máximo utilizado, así como, la masa mínima reúne las condiciones de la muestra, por consiguiente, debe reunir las características de calidad como peso específico, contenido de humedad y absorción uniforme (Jamshidi, 2019).

Los esfuerzos internos a que están sometidos los materiales de las fibras interiores de los concretos, (SCT-GEOTERRA, n.d.); son soportados y transmitidos al suelo por dos factores:

1. Rozamiento entre los granos como la cohesión de origen natural.
2. Rozamiento entre los granos por acción capilar de origen artificial.

Los daños ocasionados en las fibras expuestas a la fricción, tienen relación directa con los daños en las capas internas (DGOARN, 2023), si y solo si, existe una relación directa de abrasión entre ellas, los esfuerzos que ocasionan daños internos, difícilmente son atribuibles al espesor de la capa, sino al desgaste de los granos en contacto directo unos con otros. A este respecto, es indispensable separar los daños en las gravas de mayor tamaño y compararlos con los daños de los agregados de menor tamaño (IDM, 2024).

1.1. Prueba de Abrasión [A]

Esta prueba consiste en introducir una muestra en un cilindro metálico, como se observa en la Figura 1, con una abertura que permita introducir la muestra de prueba y las 12 esferas metálicas (SCT, 2002),



Figura 1: Esquema de la Maquina de los Angeles.  
Elaboración propia

Dicha máquina de los Ángeles cuenta con una tapa de cierre hermético diseñada con la misma curvatura del cilindro para que la superficie interior del mismo sea continua y uniforme, el cilindro girará durante 500 vueltas completas, posterior se observa el desgaste por abrasión del contacto de las esferas y el agregado grueso, como se observa en la Figura 2.

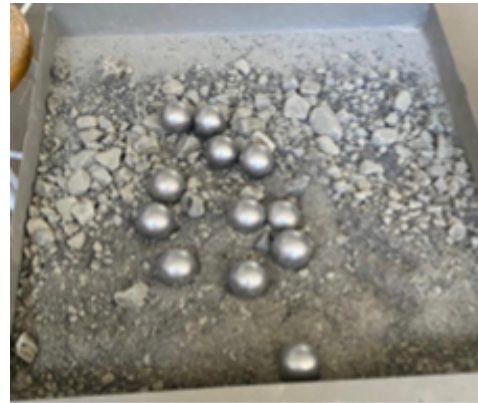


Figura 2: Esquema de la Maquina de los Angeles.  
Elaboración propia

La preparación de la muestra de agregados pétreos, obtenida según se establece en el Manual M·MMP·2·02·019, Muestreo de Agregados Pétreos, se hace utilizando la Tabla 1.

Tabla 1: Composición de la muestra de prueba de abrasión.

Rango de tamaños		Masa de la fracción
Milímetros	Pulgadas	Gramos
25 - 37.5	1 - 1 1/2	1250 +- 25
19 - 25	3/4 - 1	1250 +- 25
12.5 - 19	1/2 - 3/4	1250 +- 25
9.5 - 12.5	3/4 - 1/2	1250 +- 25

El objeto de la prueba consiste en colocar una muestra de agregado en el interior del cilindro metálico se adicionan 12 esferas, se espera que estas esferas choquen con el agregado y con ello desgasten aplicando las especificaciones que se muestran en la: (Norma, 2015).

El esfuerzo puede poner en peligro la estabilidad de las capas del concreto (Cerón, 2024). Es frecuente que ciertos materiales mal graduados o ligeramente plásticos, constituyan una capa de apoyo suficiente para soportar esfuerzos grandes, sin embargo, no podrían constituir la capa de base resistente cuando se presenta fricción debido a movimiento interno o microhuecos anidados sin resistencia óptima (Escamilla, 2018).

1.2. *Fibras de Neumático (T<sub>N</sub>)*

El producto de trituración de neumático [T<sub>N</sub>] 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 más finos (V. Ortega, 2018).

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 (Wang, 2016).

Estas mismas fallas se pueden evaluar al tener una comparación de las fibras de neumático triturado y su combinación en concretos hidráulicos. De igual importancia, la contaminación ambiental es un desafío global ampliamente reconocido, y los neumáticos representan uno de los productos de consumo más significativos a nivel mundial. Son residuos difíciles de descomponer en la naturaleza y, una vez que se vuelven inservibles, a menudo son depositados en vertederos donde pueden permanecer intactos durante más de 500 años sin experimentar degradación alguna (Milián, 2019).

1.3. *Prueba de Revenimiento [R]*

El revenimiento es la primera prueba que se le practica a un concreto en estado fresco, de acuerdo con lo establecido en el Manual M·MMP·2·02·056, Revenimiento del Concreto Fresco (CEMEX, 2021). Cuando no existan especificaciones al respecto, se aplicarán los valores nominales señalados en la [Tabla 2](#).

**Tabla 2:** Características del revenimiento

Revenimiento	Tolerancia	Consistencia
Menor de 5, [1]	± 1,5	Baja
Entre 5 y 10, [2]	± 2,5	Media
Mayor de 10 [3]	± 3,5	Alta

- [1] Para elementos colados en planta bajo vibración pesada. Pavimentos de calles, carreteras y aeropuertos; secciones macizas grandes.
- [2] Para pavimentos, losas para construcciones, cajones de cimentación, cimentaciones, losas estructurales, muros de subestructuras, columnas reforzadas normales, trabes, concreto para bombeo reforzadas.
- [3] Para secciones especialmente difíciles y congestionadas, en las cuales no puede emplearse la vibración. Revenimiento mayor de 18 cm no se

recomienda para uso alguno, excepto cuando se utilicen aditivos.

1.4. *Método de elemento finito.*

El Método de elemento finito [MEF] consiste en determinar las condiciones de frontera de la geometría en el área de estudio (Cerón, 2020a), 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. La aplicación del [MEF] en los problemas relacionados con ingeniería, es a menudo singular, puesto que la definición del dominio del estudio corresponde con vértices interiores al objeto de estudio (Cerón, 2020b).

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, 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.

Por lo tanto, en este trabajo se realiza una comparación en el diseño de la abrasión de una muestra por medio del método tradicional y una muestra con agregado de caucho, respecto a una interface Lagrangeana por medio del MEF. Lo anterior permitirá incrementar las variables de análisis con las cuales se diseñan los elementos base de un concreto simple del modo como se realizó en (Ceron, 2023).

1.5. *Zona de estudio*

La zona de estudio se centra en el proporcionamiento del concreto simple 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, determinada de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·2·02·053, en donde se describen las características del concreto con una resistencia a la compresión (f<sub>c</sub>) de acuerdo a un proporcionamiento basado en la utilización de un bulto de cemento de 50 kg de peso, como se observa en la [Tabla 3](#).

**Tabla 3:** Proporcionamiento del Cs

Materiales	Resistencia a la Compresión f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )					
	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

Dicho proporcionamiento se utiliza para determinar el revenimiento del concreto en estado fresco, incorporando fibras de caucho.

**2. Materiales y Métodos.**

La metodología propuesta prácticamente consiste en tres pasos, en el primer paso se realizó la prueba de abrasión al agregado grueso, el segundo paso consistió en realizar el concreto utilizando el proporcionamiento incorporando la fibra de caucho y el tercer paso consistió en realizar la prueba de revenimiento al concreto en estado fresco en cada mezcla con agregado de caucho (CROMTEK, 2022).

El estudio del sistema de utilización de fibras de caucho en la investigación utilizando un control del proporcionamiento de la mezcla de concreto 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 la abrasión, y
3. El tercero consiste en aplicar el método de evaluación de desgaste del agregado grueso, a través del control granulométrico.

Se realiza la comparativa del método tradicional del proporcionamiento de fabricación de concreto simple y con la incorporación de fibras de caucho (Clavero, 2008). Este método se aplicó como se indica en la [Figura 3](#).



Figura 3: Esquema del Modelo de investigación. Elaboración propia

La evaluación de la abrasión del agregado grueso utilizado para la fabricación del concreto hidráulico simple con fibras de caucho [EACSF], se logra previendo el comportamiento no deseado de la ejecución del concreto simple tradicional, aplicando el método de control de la abrasión, es decir, se realiza la comparación del método tradicional [MT] con el método de concreto simple modificado basado en indicadores tomados de la norma SCT, en ambos casos se aplica el modelo mostrado en la [Figura 4](#), con la finalidad de evaluar el amortiguamiento (O. González, 2007). La abrasión se controla derivando el desgaste del agregado grueso 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, tamizándolo de acuerdo a la norma de la SCT, del libro: mmp. “Métodos de muestreo y prueba de materiales”, M·MMP·2·02·032/18, con título; Materiales para Concreto Hidráulico, del capítulo de;

“Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles”.

Se utiliza el procedimiento para determinar mediante la máquina de Los Ángeles, la resistencia a la degradación de los agregados pétreos para concreto hidráulico, a que se refiere la Norma N·CMT·2·02·002, con el objetivo de determinar la Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico, en las muestras tomadas conforme al Manual M·MMP·2·02·019, Así mismo, se realiza el muestreo de agregados pétreos (Estructuras, 2015).

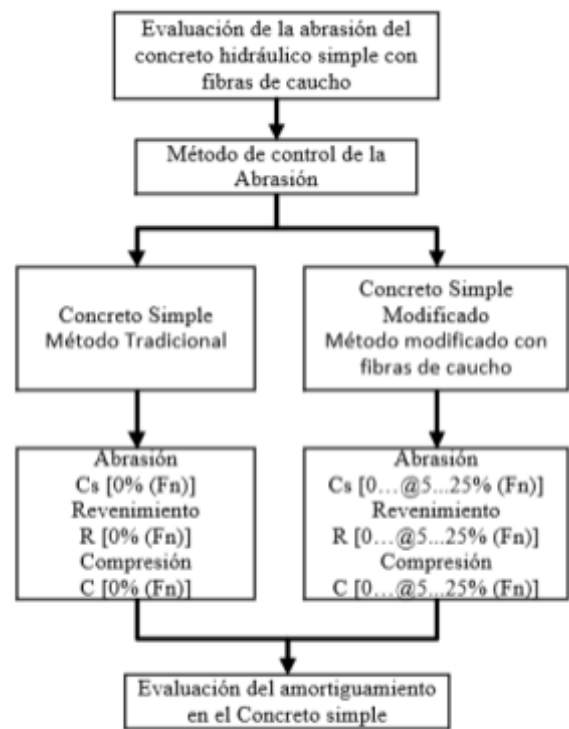


Figura 4: Esquema del Modelo de investigación. Elaboración propia

El objetivo de la prueba mecánica de los ángeles es determinar la resistencia a la degradación por trituración de los materiales pétreos empleados en el concreto hidráulico, colocando una muestra dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla referida, antes y después de haber sido sometida a este tratamiento (ASTM, 2024).

**2.1. Proporcionamiento de la mezcla.**

Se realizó concreto simple utilizando el proporcionamiento para la fabricación de concreto simple de acuerdo a las características esperadas respecto a la resistencia a la compresión como se observa en la [Tabla 4](#).

**Tabla 4:** Proporcionamiento del Cs Resistencia a la Compresión f'c (kg/cm2)

Materiales / f'c	50	100	150	200	250	300
Arena [Wa] (Kg)	1.93	1.96	1.83	1.70	1.54	1.41
Grava [Wg] (Kg)	1.77	1.67	1.66	1.68	1.63	1.66
Agua [Ww] (Kg)	0.35	0.34	0.36	0.36	0.40	0.34
Cemento [Wc] (Kg)	0.50	0.58	0.70	0.81	0.98	1.15

2.2. Diseño del sistema de fibras de caucho (T<sub>N</sub>)

Se agregó fibras de caucho (T<sub>N</sub>), a la mezcla tomando como base de cálculo el peso del concreto, (P. Ortega, 2015); con las cantidades que se observa en la [Tabla 5](#).

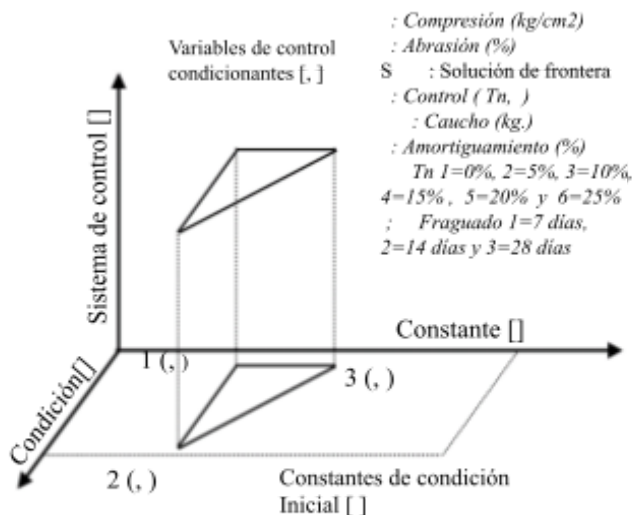
**Tabla 5:** Peso de la fibra de caucho correspondiente al % adicionado a la mezcla (gramos).

Fibra de caucho	(%)	(g)
T <sub>n</sub> (0%) [W <sub>1</sub> ]	0	0.00
T <sub>n</sub> (5%) [W <sub>2</sub> ]	0.05	250.00
T <sub>n</sub> (10%) [W <sub>3</sub> ]	0.1	500.00
T <sub>n</sub> (15%) [W <sub>4</sub> ]	0.15	750.00
T <sub>n</sub> (20%) [W <sub>5</sub> ]	0.2	1000.00
T <sub>n</sub> (25%) [W <sub>6</sub> ]	0.25	1250.00

El diseño del sistema de fibras de caucho consistió en determinar el peso correspondiente a la aplicación del porcentaje de fibras de caucho designado al proporcionamiento de la mezcla de concreto simple del procedimiento tradicional (CASTRO, 2008).

2.3. Esquema matemático

La característica de sistema de evaluación del concreto modificado se realizó utilizando el esquema de la [Figura 5](#), se consideró seis valores correspondientes a agregar en cada uno de ellos un porcentaje de fibras de caucho y aplicar la prueba de abrasión al agregado grueso utilizado en la fabricación de dicho concreto, (Tamayo, 2015).



Las constantes de la condición inicial para fabricar el concreto simple tradicional y el concreto simple modificado agregando fibras de caucho son las siguientes (Cristina, 2017):

1. La prueba de la resistencia a la compresión utilizando como constante continua un valor de f'c (kg/cm2).
2. El segundo consistente en la prueba no destructiva del concreto en estado fresco utilizando el revenimiento, y
3. El tercero consiste en aplicar el método de evaluación de desgaste del agregado grueso, a través del control granulométrico.

2.4. Formulación matricial

La [Ecuación 1](#) determina la matriz correspondiente a la realización de la prueba de abrasión del agregado grueso utilizado para elaborar concreto simple.

$$A_{(i,t)} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \dots & A_{1,n} & \vdots & \vdots & A_{u,1} & \dots & A_{u,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$   
 $i = 0\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$

A: Prueba de Abrasión

La relacion de la abrasión por desgaste del agregado grueso y el revenimiento del concreto en estado fresco utilizando el proporcionamiento para alcanzar una resistencia a la compresion crea el vector de condicion [ φ<sub>(i,t)</sub> ], lo que asegura que la resistencia a la compresion permanezca constante y finalmente la abrasión del experimento condiciona el sistema de control [ S ; Control ( Tn , ξ ) ] (Hao, 2015), por consiguiente, genera una alternativa de solución, así como se observa en la [Figura 5](#).

Dicho lo anterior, se fabricó un concreto convencional [Pc], este se determinó utilizando la [Ecuación 2](#), lo integra el proporcionamiento para fabricar un concreto simple [Cs], el agregado de fibra de caucho [T<sub>N</sub>] y el amortiguamiento [ξ] de la mezcla.

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

El “Cs” se determina con la [Ecuación 3](#) y está formado por la combinación de arena [Wa], grava [Wg], agua [Ww] y cemento [Wc].

$$C_s = W_a + W_g + W_w + W_c \quad (3)$$

La prueba de revenimiento realizada en el concreto en estado fresco genera una matriz de datos, esta se determina utilizando la [Ecuación 4](#).

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

$$R_{(i,t)} = [R_{1,1} \ \dots \ R_{1,n} \ \vdots \ \vdots \ R_{u,1} \ \dots \ R_{u,n}] \quad (4)$$

*R: Prueba de Revenimiento*

El (MEF) es un método analítico, en donde se utilizaron las funciones de forma (Ni), de manera que las variables (x, y) son tomadas de las condiciones de frontera en los vértices del modelo de la [Figura 5](#), la superficie generada por la condición del resultado de la prueba de la abrasión y la constante del resultado de la prueba de revenimiento del proporcionamiento de la mezcla del concreto, dicha superficie genera el espacio a discretizar  $\Phi$ . De tal manera, es posible conocer las características del amortiguamiento ( $\xi_{i,t}$ ), omitiendo realizar ensayos innecesarios.

Las funciones de forma y de contorno se determinan con una relación directa de la superficie muestral del experimento y las funciones de interpolación las características de revenimiento y abrasión conjuntamente con el amortiguamiento se determinan con la [Ecuación 5](#).

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

$$N_i(x, y) \xi_i = N_1 A_1 + N_2 R_1 + N_3 \xi_1 \quad (5)$$

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

$\xi$ : Amortiguamiento

El amortiguamiento basado en datos experimentales en los puntos de control se determina con la [Ecuación 2](#), además, por medio de la [Ecuación 5](#) se determina el amortiguamiento en treinta y seis valores de abrasión, esto se realiza para conocer el amortiguamiento por medio del método de Lagrange en elemento finito (SCT, 2016).

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.
$A_{(i,t)}$ $R_{(i,t)}$ y $\xi_{(i,t)}$	Son los datos de la prueba de abrasión [A], Revenimiento [R] y Amortiguamiento [ $\xi$ ].
$\xi_u$ :	Representa el valor interpolado del MEF.

Para la evaluación del sistema se realizó por medio de la identificación de la muestra. Se utiliza las variables de revenimiento determinado con datos del proporcionamiento de fabricación de la mezcla (50, 100, 150, 200, 250 y 300) kg/cm2.

La comparación del valor de abrasión y del amortiguamiento, incorporando el valor del revenimiento en todos y en cada uno de las treinta y seis pruebas realizadas se realizó en seis pasos los cuales son:

1. Las primeras seis se deben a una muestra por cada magnitud de resistencia a la compresión del concreto simple.

2. Las segundas seis se deben a una muestra por cada magnitud de resistencia a la compresión del concreto modificado al  $T_n=5\%$ .
3. Las siguientes seis se deben a una muestra por cada magnitud de resistencia a la compresión del concreto modificado al  $T_n=10\%$ .
4. Las siguientes seis se deben a una muestra por cada magnitud de resistencia a la compresión del concreto modificado al  $T_n=15\%$ .
5. Las siguientes seis se deben a una muestra por cada magnitud de resistencia a la compresión del concreto modificado al  $T_n=20\%$ .
6. Las siguientes seis se deben a una muestra por cada magnitud de resistencia a la compresión del concreto modificado al  $T_n=25\%$ .

Las muestras que fueron consideradas en la evaluación de la abrasión del agregado utilizado en la fabricación del concreto simple por cada magnitud de resistencia a la compresión únicamente fueron tomadas en cuenta aquellas cuya revenimiento alcanzaron valores de consistencia baja como se observa en la [Tabla 2](#), por consiguiente se considera la consistencia media y la consistencia alta para reportarlos en estudios futuros (SCT, 2015).

### 3. Resultados

El resultado de la prueba de abrasión, utilizando la máquina de los Ángeles genera seis matrices con información del número de tamiz utilizado, la graduación de la malla en milímetros, el material retenido por cada tamiz y el porcentaje parcial, acumulado retenido y filtrado en cada tamiz, como se observa en la [Figura 6](#).



**Figura 6:** Esquema del material retenido por cada tamiz.  
Elaboración propia

#### 3.1. Muestra experimental de abrasión.

La primera medición se llevó a cabo con datos muestrales del agregado grueso tipo basalto, obteniendo los resultados mostrados en la [Tabla 6](#). Se realizaron toma de lecturas de abrasión considerando  $T_n=0\%$ , estos valores se consideran como datos iniciales para incluirlos en las condiciones de frontera en el análisis del experimento (CROMTEK, 2022).

**Tabla 6:** Resultados del análisis de abrasión ( $T_n=0\%$ ).

Tamiz	Malla (mm)	Retenid o parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenid o parcial	% retenido acumulado	% Pasa
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	54.12
1"	25.00	344.60	344.60	12.73	12.73	41.38
3/4"	19.00	295.65	640.25	10.93	23.66	30.46
1/2"	12.50	380.12	1020.37	14.05	37.71	16.41
3/8"	9.50	292.06	1312.43	10.79	48.50	5.62
1/4"	6.30	249.05	1561.48	9.20	57.71	3.59
N° 4	4.75	171.50	1732.98	6.34	64.04	9.92
N° 8	2.36	685.98	2418.96	25.35	89.39	35.27
N° 12	1.70	287.00	2705.96	10.61	100.00	45.88
Fondo		2294.04	5000.00			
Sumas		2705.96		54.12		

La segunda medición se llevó a cabo con datos muestrales del agregado grueso tipo basalto, se observó que al incorporar la fibra de caucho modifica el porcentaje de material que se filtra por el tamiz de la prueba obteniendo los resultados mostrados en la [Tabla 7](#). Se realizaron toma de lecturas de abrasión considerando  $T_n=5\%$ .

**Tabla 7:** Resultados del análisis de abrasión ( $T_n=5\%$ ).

Tamiz	Malla (mm)	Retenid o parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenid o parcial	% retenido acumulado	% Pasa
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	69.78
1"	25.00	412.13	412.13	11.25	11.25	58.52
3/4"	19.00	289.80	701.93	7.91	19.16	50.61
1/2"	12.50	372.37	1074.30	10.17	29.33	40.45
3/8"	9.50	296.30	1370.60	8.09	37.42	32.36
1/4"	6.30	382.31	1752.91	10.44	47.85	21.92
N° 4	4.75	313.14	2066.05	8.55	56.40	13.38
N° 8	2.36	998.67	3064.72	27.26	83.66	13.89
N° 12	1.70	598.49	3663.21	16.34	100.00	30.22
Fondo		1586.79	5250.00			
Sumas		3663.21		69.78		

La tercera medición se llevó a cabo con datos muestrales del agregado grueso tipo basalto, obteniendo los resultados

mostrados en la [Tabla 8](#). Se observó que el porcentaje retenido se va incrementando correspondientemente con el incremento del porcentaje de fibra de caucho, la toma de lecturas de abrasión en esta tercera prueba de abrasión muestra resultados considerando  $T_n=10\%$ .

**Tabla 8:** Resultados del análisis de abrasión ( $T_n=10\%$ ).

Tamiz	Malla (mm)	Retenido o parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido o parcial	% retenido acumulado	% Pasa
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	70.94
1"	25.00	45.67	45.67	1.17	1.17	69.77
3/4"	19.00	251.62	297.29	6.45	7.62	63.32
1/2"	12.50	463.74	761.03	11.89	19.50	51.44
3/8"	9.50	355.12	1116.15	9.10	28.61	42.33
1/4"	6.30	484.88	1601.03	12.43	41.03	29.91
N° 4	4.75	398.62	1999.65	10.22	51.25	19.69
N° 8	2.36	1289.75	3289.40	33.06	84.31	13.36
N° 12	1.70	612.35	3901.75	15.69	100.00	29.06
Fondo		1598.25	5500.00			
Sumas		3901.75		70.94		

La cuarta medición se llevó a cabo con datos muestrales del agregado grueso tipo basalto, obteniendo los resultados mostrados en la [Tabla 9](#).

Se realizaron toma de lecturas de abrasión considerando  $T_n=15\%$ , estos valores obtenidos se consideran como de frontera incluirlos en las condiciones para formar las funciones de forma en el análisis del experimento.

**Tabla 9:** Resultados del análisis de abrasión ( $T_n=15\%$ ).

Tamiz	Malla (mm)	Retenido o parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido o parcial	% retenido acumulado	% Pasa
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	72.25
1"	25.00	246.32	246.32	5.93	5.93	66.32
3/4"	19.00	358.45	604.77	8.63	14.56	57.69
1/2"	12.50	336.40	941.17	8.10	22.65	49.59
3/8"	9.50	425.67	1366.84	10.25	32.90	39.35
1/4"	6.30	540.71	1907.55	13.02	45.92	26.33
N° 4	4.75	525.32	2432.87	12.64	58.56	13.69
N° 8	2.36	1342.00	3774.87	32.30	90.87	18.62
N° 12	1.70	379.50	4154.37	9.13	100.00	27.75
Fondo		1595.63	5750.00			
Sumas		4154.37		72.25		

La quinta medición se llevó a cabo con datos muestrales del agregado grueso tipo basalto, obteniendo los resultados mostrados en la [Tabla 10](#). Se observó que el porcentaje retenido sobrepasa del 95% de material retenido, la toma de lecturas de abrasión en esta prueba de abrasión muestra resultados considerando  $T_n=20\%$ .

**Tabla 10:** Resultados del análisis de abrasión ( $T_n=20\%$ ).

Tamiz	Malla (mm)	Retenido parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido parcial	% retenido acumulado	% Pasa
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	74.19
1"	25.00	544.55	544.55	12.23	12.23	61.95
3/4"	19.00	398.45	943.00	8.95	21.19	53.00
1/2"	12.50	319.14	1262.14	7.17	28.36	45.83
3/8"	9.50	510.67	1772.81	11.47	39.83	34.36
1/4"	6.30	389.67	2162.48	8.75	48.58	25.60
N° 4	4.75	553.77	2716.25	12.44	61.02	13.16
N° 8	2.36	1312.76	4029.01	29.49	90.52	16.33
N° 12	1.70	422.11	4451.12	9.48	100.00	25.81
Fondo		1548.88	6000.00			
Sumas		4451.12		74.19		

La sexta y última medición se llevó a cabo con datos muestrales del agregado grueso tipo basalto, obteniendo los resultados mostrados en la [Tabla 11](#).

Se observó que el porcentaje de material retenido por los tamices supera el 98%, por consiguiente, las lecturas de abrasión considerando  $T_n=25\%$ , estos valores se consideran como datos finales para incluirlos en las condiciones de frontera en el análisis del experimento.

**Tabla 11:** Resultados del análisis de abrasión ( $T_n=25\%$ ).

Tamiz	Malla (mm)	Retenido o parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido o parcial	% retenido acumulado	% Pasa
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	76.22
1"	25.00	392.37	392.37	8.24	8.24	67.98
3/4"	19.00	626.67	1019.04	13.15	21.39	54.83
1/2"	12.50	315.98	1335.02	6.63	28.02	48.20
3/8"	9.50	481.34	1816.36	10.10	38.13	38.09
1/4"	6.30	578.97	2395.33	12.15	50.28	25.94
N° 4	4.75	620.48	3015.81	13.02	63.31	12.91
N° 8	2.36	1370.46	4386.27	28.77	92.08	15.86
N° 12	1.70	377.50	4763.77	7.92	100.00	23.78
Fondo		1486.23	6250.00			
Sumas		4763.77		76.22		



Los resultados muestran un comportamiento no lineal independientemente del resultado del revenimiento y de la resistencia a la compresión del concreto elaborado con el proporcionamiento en porcentaje de peso mezclado en la fabricación del concreto simple modificado con fibras de caucho (G. González, 2011).

3.2. *Muestra experimental del revenimiento.*

La medición se llevó a cabo con datos muestrales del concreto simple en estado fresco, obteniendo los resultados mostrados en la [Tabla 12](#). Se realizaron toma de lecturas de revenimiento considerando seis valores de porcentaje de las fibras de neumático [Tn], estos valores se consideran como datos para incluirlos en las condiciones de frontera en el análisis del experimento (Lee, 2007).

**Tabla 12:** Resultado del Revenimiento [cm.]

<i>f'c</i>	<i>Tn</i>	<i>Tn</i>	<i>Tn</i>	<i>Tn</i>	<i>Tn</i>	<i>Tn</i>
<i>kg/cm2</i>	(0 %)	(5 %)	(10 %)	(15 %)	(20 %)	(25 %)
50	5.12	5.19	5.23	5.31	5.40	5.48
100	5.09	5.15	5.19	5.26	5.33	5.40
150	5.07	5.11	5.15	5.20	5.27	5.33
200	5.05	5.08	5.11	5.16	5.21	5.27
250	5.03	5.05	5.08	5.12	5.16	5.21
300	5.01	5.03	5.06	5.09	5.12	5.17

3.3. *Procesamiento de información*

El procesamiento se realiza en tres etapas:

- En la primera se realiza el análisis de la etapa primaria, por lo tanto, se identifican los valores de la abrasión considerando el valor acumulado retenido.
- En la segunda etapa se realiza el análisis de las variables condicionantes, por lo tanto, se identifican los valores del proporcionamiento de la mezcla para alcanzar 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 5](#), para determinar el amortiguamiento despejándolo de la [Ecuación 2](#).

Se realizó primeramente las funciones de forma del concreto modificado con el objetivo de evaluarlo, en cada caso se utilizó un porcentaje en peso de adición de fibras de caucho, como se muestra en la [Tabla 12, 13 y 14](#).

**Tabla 12:** Funciones de forma EACSF [Pc Fibras, Tn = 0 %]

<i>f'c</i>	<i>Amortiguamiento</i>	<i>Revenimiento</i>	<i>Abrasión</i>
<i>kg/cm2</i>	%	Cms	%
50	0.1960	5.1193	4.5880

100	0.3237	5.0917	4.5880
150	0.6153	5.0668	4.5880
200	0.8707	5.0450	4.5880
250	1.0922	5.0261	4.5880
300	1.2814	5.0100	4.5880

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

**Tabla 13:** Funciones de forma EACSF [Pc Fibras, Tn = 15 %]

<i>f'c</i>	<i>Amortiguamiento</i>	<i>Revenimiento</i>	<i>Abrasión</i>
<i>kg/cm2</i>	%	Cms	%
50	0.5199	5.3143	2.7750
100	0.8587	5.2566	2.7750
150	1.6325	5.2045	2.7750
200	2.3101	5.1590	2.7750
250	2.8978	5.1194	2.7750
300	3.3997	5.0857	2.7750

Se observó que el valor del revenimiento disminuye en correspondencia al incremento de la resistencia a la compresión, sin embargo, la variable de la abrasión se identifica como independiente del revenimiento y el proporcionamiento de la mezcla de concreto para alcanzar la resistencia a la compresión (Plati, 2019).

**Tabla 14:** Funciones de forma EACSF [Pc Fibras, Tn = 25 %]

<i>f'c</i>	<i>Amortiguamiento</i>	<i>Revenimiento</i>	<i>Abrasión</i>
<i>kg/cm2</i>	%	Cms	%
50	0.8452	5.4795	2.3780
100	1.3959	5.4001	2.3780
150	2.6537	5.3286	2.3780
200	3.7552	5.2659	2.3780
250	4.7106	5.2116	2.3780
300	5.5264	5.1652	2.3780

El análisis de los datos determinados de la evaluación de la abrasión, son procesados y con esta información se calcula el amortiguamiento, incorporando para este fin a la [Ecuación 5](#).

4. **Análisis.**

Para la comparativa de la etapa condicionante se toma en consideración la resistencia a la compresión constante de 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.

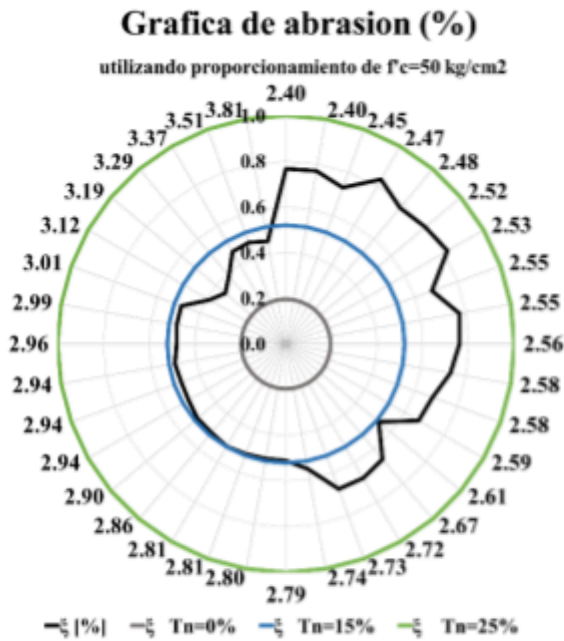
4.1. *Grafica de amortiguamiento*

La información que muestra la [Tabla 12](#), es representativa y da solución al revenimiento, cumpliendo una

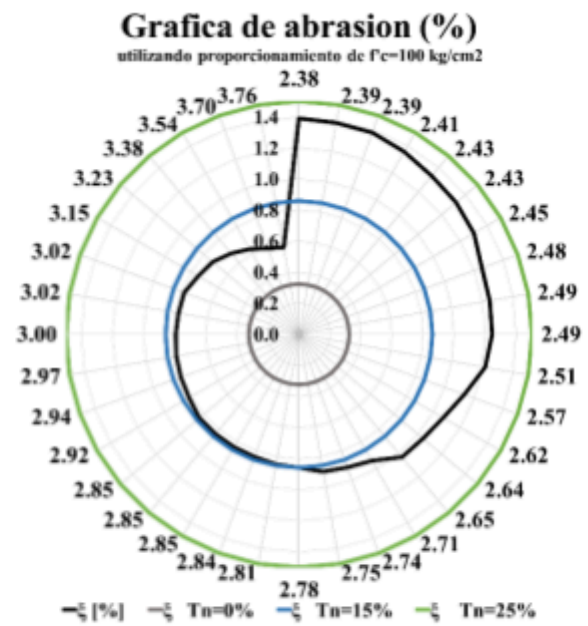
Para la comparativa de la etapa de control del sistema, se construye la simulación de las tres etapas utilizando las variables determinadas con la [Ecuación 2](#). Con ello se construyen graficas de la abrasión en correspondencia al proporcionamiento de la mezcla con la resistencia a la compresión.

correspondencia directa, este dato sirve para realizar el análisis de solución, para ingresar a la gráfica correspondiente a dicho amortiguamiento (Wang, 2016).

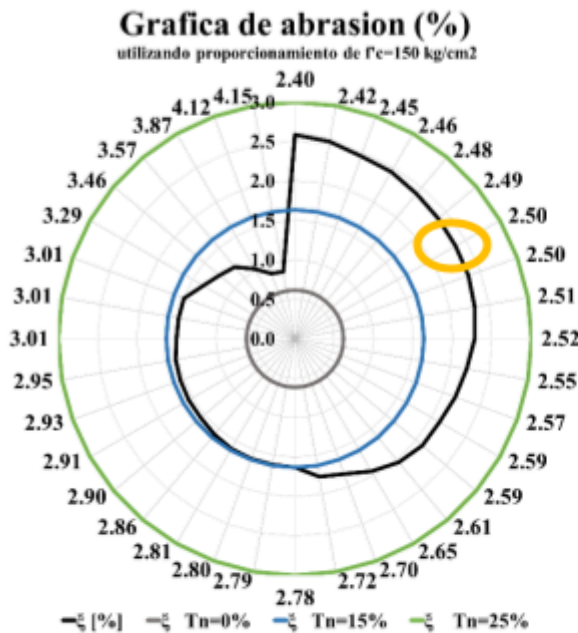
Se utiliza la [Ecuación 5](#) para determinar la simulación del amortiguamiento con el uso de las variables de la abrasión y el revenimiento determinado con datos de la mezcla de  $f^c=50, 100, 150, 200, 250$  y  $300 \text{ kg/cm}^2$ , como se observa en la [Figura 7](#).



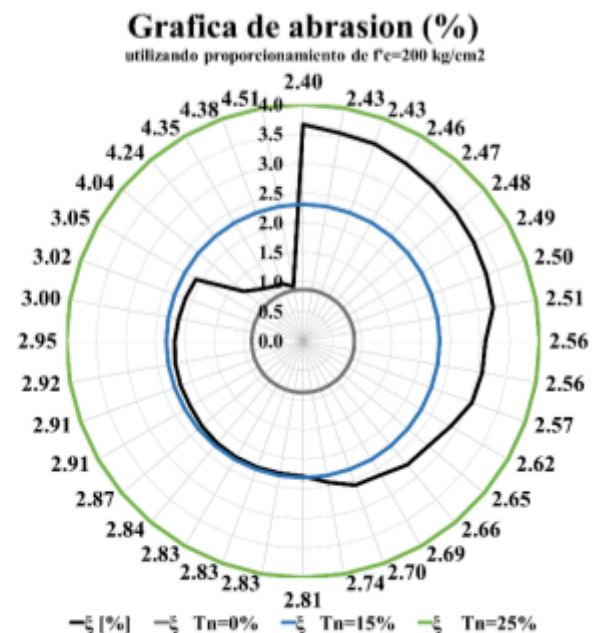
Grafica a)



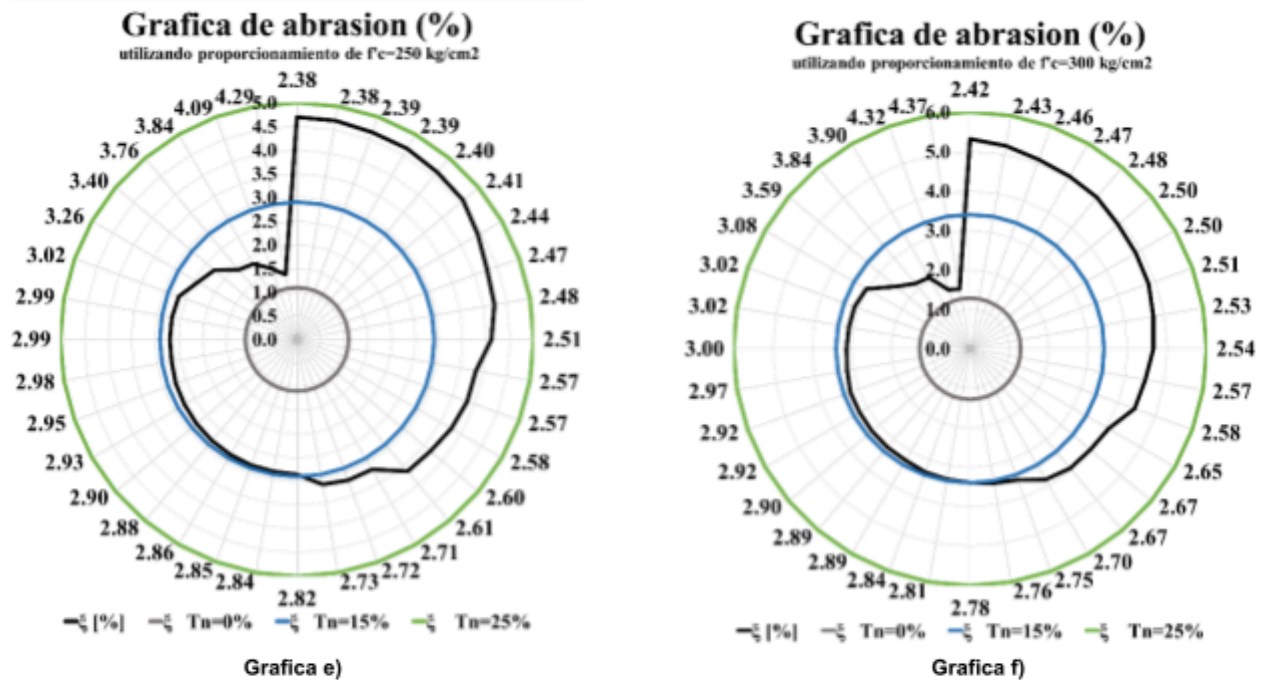
Grafica b)



Grafica c)



Grafica d)



**Figura 7:** Representación gráfica de la abrasión de los agregados utilizando caucho en porcentajes de Tn = 0, 15 y 25% del proporcionamiento de la elaboración del concreto simple con una resistencia a la compresión  $f'c=50, 100, 150, 200, 250$  y  $300$  kg/cm<sup>2</sup>  
Elaboración propia

Dicho lo anterior, los resultados de la prueba de abrasión obtenidos a partir de utilizar seis muestras utilizadas en la prueba de desgaste en la máquina de los ángeles, lo que denota que el resultado es verdadero, por lo tanto, se omitió el cuestionamiento de calibrado de equipo de ensaye.

## 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 en los factores observados en la [Figura 7](#).

Por consiguiente, la resistencia a la compresión determinada para dar seguimiento a la investigación utilizando concreto simple modificado de incorporación en proporción de peso de fibras de caucho, muestra un avance de aumento de su vida útil al descubrir el hallazgo de un incremento del amortiguamiento con valores máximos de 5.5% al incorporar 25% de fibra de caucho (Lu, 2015).

La [Figura 7](#) muestra el comportamiento de la evaluación del desgaste por abrasión del agregado grueso; se observa un avance de aumento de su vida útil al descubrir el hallazgo de un incremento del amortiguamiento con valores máximos de 5.5% al incorporar el proporcionamiento de materiales para un concreto de  $f'c=300$  kg/cm<sup>2</sup> y con un revenimiento de 5.1 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 del amortiguamiento, del  $f'c$  y del revenimiento.

### 5.2. Aplicabilidad

Si se realiza un agregado grueso para fabricar concreto simple de  $150$  kg/cm, en donde se requiere mantener el desgaste por abrasión menor al 2.5%, se determina:

- El porcentaje de fibra de caucho máxima recomendable.
- El revenimiento optimo y
- El porcentaje de amortiguamiento para incrementar su durabilidad.

Instrumentos de evaluación: [Figura 7](#) y [Tabla 12](#).

Datos:

$f'c$  de proyecto ( $150$  kg/cm); abrasión mínima = 2.5%;

Solución:

En la [Figura 7](#), se ingresa en la [Grafica c\)](#), con el  $f'c$  mínimo y con una abrasión de 2.5%.

- Se obtiene un valor de 20% en peso del concreto simple de fibra de caucho.

- b) Se ingresa a la Tabla 12, y con el valor del 20% de  $T_n$  y  $f'_c$  de 150 kg/cm<sup>2</sup>, se obtiene el revenimiento de 5.27 cm.
- c) Se ingresa a la [Gráfica c](#), de la [Figura 7](#) con los datos del abrasión de 2.5%, se encuentra el valor de  $\xi = 2.4\%$  se marca en color anaranjado.

## 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 de la abrasión del agregado grueso 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, 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.

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

1. El diseño del sistema incrementando la fibra de caucho en la prueba de abrasión utilizando la máquina de los ángeles usando como base de análisis el concreto modificado en proporcionamiento de  $f'_c = 150$  kg/cm<sup>2</sup> se reduce la abrasión en el 51.92%
2. El revenimiento utilizado como sistema de control permanece uniforme teniendo una variación del 4.9% del concreto simple tradicional respecto al concreto simple modificado.
3. El amortiguamiento controlado bajo el esquema de las variables aleatorias de la abrasión y del revenimiento permanece con valores reducidos con una magnitud máxima del 23.19% 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 para utilizarla en un piso convencional, con un revenimiento adecuado y con un proporcionamiento óptimo.

## 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 en Ingeniería Civil, (ICBI), de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por su apoyo para la realización de la presente investigación.

## Referencias

- ASTM. (2024). Base de conocimientos prueba de abrasión. *ASTM-Norma*, 2024.
- CASTRO, G. (2008). materiales y compuestos para la industria del neumático. *materiales y compuestos para la industria del neumático*, 1–57.
- CEMEX. (2021). Manual del constructor. *CEMEX*, 102.
- Ceron, J. (2023). Sectorización de una red de agua potable utilizando el método de elemento finito Sectorization of a drinking water network using the finite element method. *ADI*, 11(21), 338795. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v11i21.11017>
- Cerón, J. (2020a). Cálculo de la resistencia del suelo al interpolarlo con el MEF. *Padi*, 8(15), 7–13. <https://doi.org/10.29057/icbi.v8i15.4974>
- Cerón, J. (2024). Nivel de evaluación del Mecanismo de falla en una construcción de 20 años de edad. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 11(22), 129–137. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11067>
- Clavero, R. (2008). El neumático , “ ese compañero de viaje .” *Canales de Mecánica y Electricidad* , 82–85.
- Cristina, A. (2017). cartilla dosificación de mezclas de concreto. *Universidad de Santo Tomas, Colombia*, 24.
- CROMTEK. (2022). Qué es un test de abrasión y cómo se realiza. *Test*, 3.
- OGOARN. (2023). Escalas de Magnitud. *Dirección General de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales SIHI*, 503, 9631. <https://doi.org/https://www.snet.gob.sv>
- Escamilla, J. (2018). Caracterización Geoestadística de una Probable Intrusión Magmática Activa , a Partir de la Sismicidad Reciente en el Estado de Hidalgo. *Boletín Científico Del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI)*, 11(11), 43–47. <https://doi.org/https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/7633/>
- Estructuras, M. P. (2015). Norma N-CMT-2-02-005/04 CMT. materiales para estructuras, concretos hidraulicos calidad del concreto hidraulico. *SCT*, 1–12.
- Ghasemi, A. (2021). Wellington building inventory: rapid earthquake response framework. *NZSEE, New Zealand Society*, 8. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/10092/101528>
- González, G. (2011). Recomendaciones para obtener resultados confiables de resistencia de cilindros de concreto. *4 Métodos y Materiales*, 10.
- González, O. (2007). Modelación matemática de la superficie de contacto suelo-neumático Mathematical modeling of soil-tire contact surface. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16, 4.
- 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>
- IDM. (2024). Probador de abrasión din. *IDM*, 3.
- 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>
- Lee, H. J. (2007). Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements. *Construction and Building MATERIALS*, 21, 1079–1087. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.01.003>
- 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>
- Milián, G. A. (2019). Foro internacional, edificaciones sustentables y la normalización. *Instituto de Ingeniería de La UNAM*, 30. <http://www.ii.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta/Gacetamayo-junio-2019/Paginas/edificaciones.aspx>
- Norma, A. (2015). Anexo 6.- Norma SCT para prueba de desgaste Los Ángeles. *SCT*, 5.
- Ortega, P. (2015). Estudio de las condiciones que generan un desgaste anormal de los neumáticos radiales para vehículos pesados que impiden su reutilización como base para reencauche. *Cuenca – Ecuador*, 134.
- 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>
- 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>
- SCT-GEOTERRA. (n.d.). Construcción de camino. *Geoterra*, 171.
- SCT. (2016). MANUAL para obtener los Volúmenes de tránsito en carreteras. *SCT-NORMA*, 173.
- SCT. (2015). Norma M-MMP-2-02-058/04 métodos de muestreo y prueba de materiales, materiales para estructuras, Materiales para Concreto Hidráulico, Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto. *SCT-NORMA*, 1–12.
- SCT, N. (2002). Anexo 6.- Norma SCT para prueba de desgaste Los Ángeles. *SCT*, 5.
- Tamayo, J. (2015). Estudio de la Degradación de los Agregados. *Ingeniería Civil*, 9.
- 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>