

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Análisis de datos para el desarrollo de un método de campo  
para determinar el parámetro de densidad de fisuras**

**Milton Alexander Lascano Osorio**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniería Civil

Quito, 03 de mayo de 2021

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Análisis de datos para el desarrollo de un método de campo  
para determinar el parámetro de densidad de fisuras**

**Milton Alexander Lascano Osorio**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Juan José Recalde Rosero, Ph.D**

Quito, 03 de mayo de 2021

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Milton Alexander Lascano Osorio

Código: 00124179

Cédula de identidad: 172297632-9

Lugar y fecha: Quito, 03 de mayo de 2021

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

Durante las manifestaciones desde el 3 de octubre de 2019, las oficinas de la Contraloría General del Estado fueron atacadas. El lunes 7 de octubre, una turba de encapuchados prendió fuego en el interior. A fecha de 12 de octubre del 2020, un año después, el edificio quemado no ha podido ser habilitado. El informe final de daños cuantificó las pérdidas en \$13'017.568.

Este proyecto consiste en la cuantificación de resultados del trabajo de titulación de Andrea Moreno, Iván Paredes, Sabine Orellana y Romina Ayala quienes evaluaron parámetros de daño en losas y núcleos de hormigón a diferentes mezclas (M3, M4, M5), sometidos a altas temperaturas (450 °C por dos horas) para luego proponer una metodología de campo.

Para cada mezcla (M3, M4, M5) se fabricaron tres losetas de 40 x40 x 20 cm y se evaluó velocidad de pulso ( $V_p$ ), velocidad de corte ( $V_s$ ), número de rebote (NR); donde el NR después del daño incrementó debido a que una capa de la superficie se hizo más rígida en M4 y M3. En mojado y seco después del daño, la  $V_s$  fue mayor a la  $V_p$ , por lo tanto, se puede deducir que el método utilizado para la obtención de la  $V_s$  después de la exposición a altas temperaturas es muy sensible. Sí fue factible estimar el parámetro de densidad de fisuras en hormigón sano, midiendo  $V_p$  y  $V_s$  en estado seco y mojado, pero se buscó otro método.

Dicho esto, de las tres losetas se extrajeron núcleos, los mismas que fueron sometidas a altas temperaturas. El módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) se comportó como debería ser ya que, el M3 fue mayor, M4 intermedio, M5 menor mientras que, cuando se encuentra mojado el  $E_d$  aumenta. Debido a que los resultados de  $V_p$  si fueron confiables tanto para estado mojado como para estado seco, se recomienda analizar el parámetro de densidad de fisuras solo con el valor de  $V_p$  y asumiendo un valor de Poisson.

**Palabras clave:** parámetro de densidad de fisuras, velocidad de pulso, velocidad de corte, módulo de elasticidad dinámico, métodos no destructivos, hormigón, fuego.

## ABSTRACT

During the demonstrations since October 3, 2019, Contraloría General del Estado's offices were attacked. On Monday, October 7, a mob of hooded men lit a fire inside the facilities. On October 12, 2020, a year later, the burned building could not be enabled to operate again. The final damage report quantified the losses at \$ 13,017,568.

This project consists of the quantification of the results of the titling project of Andrea Moreno, Iván Paredes, Sabine Orellana and Romina Ayala who evaluated damage parameters in concrete slabs and cores at different mixtures (M3, M4, M5), subjected to high temperatures (450 °C for two hours) to then propose a field methodology.

For each mixture (M3, M4, M5) three slabs of 40 x40 x 20 cm were manufactured and pulse velocity ( $V_p$ ), shear wave velocity ( $V_s$ ), rebound number (NR) were evaluated; where the NR after damage increased due to a stiffer surface layer in M4 and M3. In wet and dry after damage,  $V_s$  was higher than  $V_p$ , therefore, it can be deduced that the method used to obtain  $V_s$  after exposure to high temperatures is very sensitive. It was feasible to estimate the crack density parameter in healthy concrete, measuring  $V_p$  and  $V_s$  in the dry and wet state, but another method should be searched.

That said, cores were extracted from the three slabs, the same ones that were subjected to high temperatures. The dynamic modulus of elasticity ( $E_d$ ) behaved as it should be, since M3 was higher, M4 intermediate, M5 lower, while  $E_d$  increases when those were wet. Because the  $V_p$  results were reliable both for wet and dry conditions, it is recommended to analyze the crack density parameter only with the value of  $V_p$  and assuming a Poisson value.

**Keywords:** crack density parameter, pulse velocity, shear wave velocity, dynamic modulus of elasticity, non-destructive methods, concrete, fire.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>10</b>
1.1	Antecedentes	10
1.2	Justificación	11
1.3	Objetivos	12
1.4	Actividades a realizar	12
1.5	Resultados esperados	13
1.6	Definiciones	13
<b>2</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>14</b>
2.1	Revisión de literatura	14
2.1.1	Efectos de exposición del hormigón a fuego	14
2.1.2	Ondas de esfuerzos en medios elásticos	17
2.1.3	Ensayos no-destructivos	18
2.1.4	Transporte de masa en el hormigón	19
2.1.5	Parámetro de densidad de fisuras en el hormigón	21
2.2	Plan experimental	22
2.3	Metodología	23
2.3.1	Diseño de mezclas	23
2.3.2	Fabricación de especímenes y curado	24
2.3.3	Ensayos	25
2.3.4	Exposición a mediana temperatura	25
2.3.5	Recopilación de datos	26
2.4	Resultados	26
2.4.1	Características del hormigón	26
2.4.2	Losas	26
2.4.3	Núcleos	28
2.5	Análisis de resultados	29
2.5.1	Características del hormigón	29
2.5.2	Losas	31
2.5.3	Núcleos	35
2.6	Propuesta de metodología de campo para estimar el parámetro de densidad de fisuras	38
2.7	Conclusiones y Recomendaciones	39
2.7.1	Conclusiones	39
2.7.2	Recomendaciones	40
	<b>APÉNCIDE A: METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EL PARÁMETRO DE DENSIDAD DE FISURAS EN CAMPO</b>	<b>41</b>
	<i>Referencias bibliográficas</i>	<i>44</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Pérdida de la resistencia en función de la temperatura (Neville, 1999) .....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2: Especímenes por mezcla .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3: Plan experimental por losetas.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4: Plan experimental por núcleos .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 5: Dosificación de la mezcla M3 (Zhindón, 2018) .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 6: Dosificación de la mezcla M4 (Zhindón, 2018) .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 7: Dosificación de la mezcla M5 (Zhindón, 2018) .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 8: Ensayos realizados .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 9: Trabajos de titulación .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 10: Especímenes sin daño .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 11: Velocidad de pulso.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 12: Velocidad de corte .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 13: Número de rebote .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 14: Módulo de elasticidad dinámico .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 15: Parámetro de densidad de fisuras.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 16: Masa.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 17: Velocidad de pulso (Orellana, 2020) .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 18: Velocidad de corte (Orellana, 2020).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 19: Módulo de elasticidad dinámico (Orellana, 2020).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 20: Parámetro de densidad de fisuras (Orellana, 2020) .....</i>	<i>29</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Influencia a la exposición a temperatura con W/C=0.45 (Neville, 1999).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2: Influencia de la temperatura en el módulo de elasticidad (Neville, 1999) .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3: Módulo de elasticidad estático del hormigón (Wight &amp; MacGregor, 2015). .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4: Mecanismo experimental para la medición de velocidad de corte (Orellana, 2020).. .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5: Resultados de la absorción inicial y secundaria de la mezcla M3 (Ayala, 2015).. .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6: Fórmulas del modelo de O’Connell &amp; Budiansky (1974) (Rosero, 2018). .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7: Relaciones entre parámetro de densidad de fisuras y otros parámetros (O’Connell &amp; Budiansky, 1974).. .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8: Armado de horno no industrial para exposición a altas temperaturas (Moreno, 2018) .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9: Detalle del hormigón (Zhindón, 2018) .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10: Masa de las mezclas (Moreno, 2018), (Paredes, 2020).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 11: Tasa de absorción (Ayala, 2019) .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 12: Índice de permeabilidad del aire (Ayala, 2019) .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13: Velocidad de pulso (Moreno, 2018), (Paredes, 2020).....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14: Velocidad de corte (Moreno, 2018), (Paredes, 2020).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15: Número de rebote (Moreno, 2018), (Paredes, 2020).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16: Módulo de elasticidad dinámico (Moreno, 2018), (Paredes, 2020).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17: Parámetro de densidad de fisuras (Moreno, 2018).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 18: Módulo de elasticidad dinámico (Orellana, 2020).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19: Velocidad de pulso (Orellana, 2020) .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 20: Velocidad de corte (Orellana, 2020).....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 21: Parámetro de densidad de fisuras (Orellana, 2020) .....</i>	<i>37</i>

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

El hormigón es el material más utilizado en la construcción, siendo un componente esencial para la gran parte de infraestructura y viviendas. Durante manifestaciones desde el 3 de octubre de 2019, las oficinas fueron atacadas, ubicado en la avenida 6 de diciembre y Tarqui. El lunes 7 de octubre, una turba de encapuchados irrumpió, saqueando e incendiando su edificio matriz en Quito, en medio de un paro nacional de 11 días, contra la eliminación del subsidio a los combustibles.

Los atacantes destruyeron vidrios y planchas de metal de la fachada de edificación y a las 11am del sábado 12 de octubre, otro grupo encapuchados nuevamente incursionaron en el edificio, imágenes de cámaras de vigilancia captaron a los atacantes destruyendo mobiliario con palos. Durante el asalto, oficinas, sistemas electrónicos, áreas servicio y vehículos fueron destruidos. Los asaltantes encendieron el fuego en el interior de las instalaciones.

El cuerpo de bomberos logro controlar el incendio a las 6pm del sábado 12 octubre. A fecha de 12 octubre del 2020, un año después, el edificio quemado no ha podido ser habilitado para volver a funcionar. En las imágenes, se muestra con las huellas del ataque en la fachada, mobiliario quemado y escombros acumulados.

En febrero de 2020, la contraloría presentó el reclamo a la aseguradora con la que habría suscrito las pólizas de todo riesgo de incendio. El informe final de daños cuantificó las pérdidas en \$13'017.568 que deben ser cubiertos por la empresa aseguradora.

Por lo cual, conllevan implicaciones socioeconómicas y por tanto se requiere estudiar su durabilidad y vida útil porque estos parámetros dependen de su permeabilidad y capacidad de absorción. A lo largo de su vida el hormigón se somete a cambios de temperatura ya sea por exposición a luz solar, agua, sobrecargas, eventos extremos (incendios). Por lo cual es

imprescindible realizar una cuantificación del daño, enfocado en la microestructura del mismo con un indicador de daño como el parámetro de densidad de fisuras.

Este proyecto consiste en la cuantificación de resultados del trabajo de titulación de Andrea Moreno, Iván Paredes, Sabine Orellana y Romina Ayala quienes evaluaron parámetros de daño en losas y núcleos de hormigón de diferentes mezclas (M3, M4, M5), sometidos a altas temperaturas (450 °C *por dos horas*), usando ensayos no destructivos (ondas de esfuerzo) antes y después del daño, evaluados en estado mojado y seco.

## 1.2 Justificación

La exposición a condiciones de evento extremo como altas temperaturas produce alteraciones físicas en la microestructura del hormigón, resultando en reducción de las propiedades mecánicas como: resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, agrietamiento, fisuración y desprendimiento. El deterioro de estas propiedades está directamente relacionado con factores inherentes en los materiales llámese agregados, cemento, relación agua-cemento y aditivos.

A diferencia de otros materiales de construcción como madera, plásticos o espumados, el concreto es incombustible, por lo tanto, no emite gases tóxicos cuando se expone a altas temperaturas.

Un incendio constituye una amenaza para la vida por la asfixia, envenenamiento o temperaturas elevadas, sin embargo, al producirse en un edificio el peligro aumenta por la propia estructura. En un recinto exterior, con aire fresco, es casi imposible superar los 700°C mientras que, en un recinto cerrado la temperatura sube un 30% más debido a la reflexión y radiación de las paredes.

Para tener una referencia de cómo afectan las altas temperaturas a los materiales, diremos que a los 400 °C el acero se vuelve dúctil y a los 600 °C se produce una bajada brusca de su

resistencia. El hormigón comienza a deteriorarse a temperaturas superiores a los 380 °C en periodos prolongados de tiempo, pero a los 400 °C se produce una pérdida de resistencia entre 15-25 %. En contraste por encima de los 800°C, deja de poseer una resistencia a la compresión viable y se debilitará en mayor medida al enfriarse cuando se apague el fuego.

La evaluación de las propiedades antes y después del daño, puede diagnosticar el hormigón y por consiguiente la capacidad del sistema estructural, definiendo estrategias de intervención como reparación, reforzamiento o demolición.

### **1.3 Objetivos**

Los objetivos del presente proyecto son los siguientes:

- a) Recopilar y analizar los datos experimentales de propiedades físicas antes y después de daño de tres mezclas de hormigón.
- b) Cuantificar el daño en los especímenes a través del parámetro de densidad de fisuras.
- c) Proponer una metodología de campo para determinar el parámetro de densidad de fisuras.

### **1.4 Actividades a realizar**

Las actividades realizadas para llevar a cabo este trabajo de titulación son:

- a) Recopilar información experimental existente
- b) Analizar datos
- c) Cuantificar cambios en el parámetro de densidad de fisuras
- d) Proponer una metodología de campo

## 1.5 Resultados esperados

Los resultados esperados son los siguientes:

- a) Cuadro de recopilación de datos experimentales completo
- b) Cuadro con parámetro de densidad de fisuras antes y después del daño
- c) Análisis de los cambios en las propiedades físicas antes y después del daño
- d) Propuesta de metodología de campo

## 1.6 Definiciones

Algunos términos de interés relacionados con el trabajo de titulación:

F<sub>c</sub>: Resistencia a la compresión de diseño

API: Índice de permeabilidad del aire

E<sub>d</sub>: Módulo de elasticidad dinámico

S<sub>i</sub>: Tasa de absorción inicial

S<sub>s</sub>: Tasa de absorción secundaria

ε: Parámetro de densidad de fisuras

NR: Número de rebote

V<sub>s</sub>: Velocidad de corte

V<sub>p</sub>: Velocidad de pulso

## 2 DESARROLLO

### 2.1 Revisión de literatura

#### 2.1.1 Efectos de exposición del hormigón a fuego.

Las resistencias a compresión y tensión indirecta, hecho con agregado de piedra caliza, expuesto a temperatura alta por ocho meses. Los especímenes probados fueron cilindros 100mmX200mm, curados con humedad por 28 días, almacenado en laboratorio por 16 semanas para luego ser calentados a 20°C por hora en condiciones tales que ocurriría pérdida de agua del concreto.

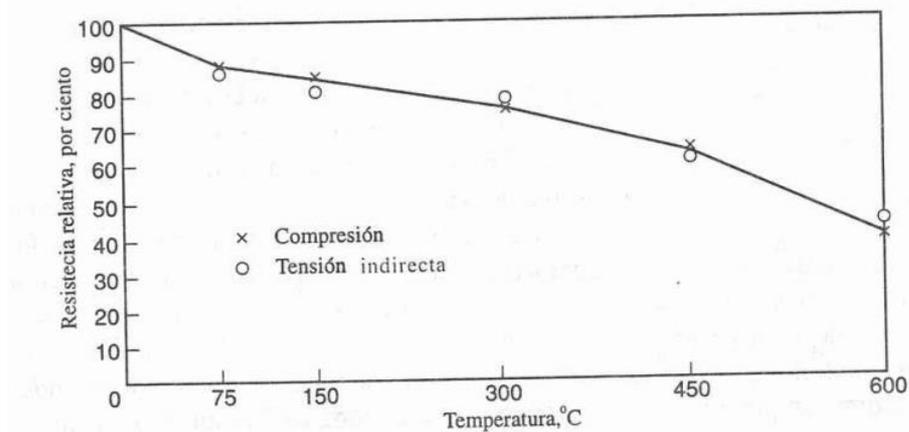


Figura 1: Influencia a la exposición a temperatura con  $W/C=0.45$  (Neville, 1999)

De la figura, la resistencia antes de ser expuesto, existe una pérdida sostenida de resistencia con un aumento de la temperatura. La pérdida con respecto a la resistencia a compresión es ligeramente menor a  $W/C$  de 0.60 que a 0.45. No obstante, las mezclas más pobres manifiestan sufrir una pérdida relativamente más baja que otras ricas.

La influencia de la relación  $W/C$  sobre la pérdida de resistencia es notable en la resistencia a tensión directa; la cual es similar a la resistencia a la compresión. También no se observó ningún efecto de la duración de la exposición (ocho meses) y pérdida relativa entre concreto hecho con cemento portland y otro con ceniza volante.

Pruebas adicionales por los mismos investigadores, mostró que un incremento en la duración de la exposición a una temperatura de 150°C o más alta, de dos a 120 días, incrementa la pérdida de resistencia a la compresión, ocurriendo la mayor parte tempranamente. Pruebas con agregado basáltico mostró que dentro de las 2 horas de incremento de temperatura ocurre la mayor parte de resistencia. Como la temperatura del concreto y exposición no necesariamente son las mismas, por lo cual los detalles de los métodos de prueba influyen en la medición (Neville, 1999).

*Tabla 1: Pérdida de la resistencia en función de la temperatura (Neville, 1999)*

Tabla 8.6 Resistencia a la compresión como porcentaje de resistencia de 28 días a temperatura normal (con base en ref. 8.44)					
Temperatura máxima, °C	20	200	400	600	800
Variación de resistencia residual, (%)	100	50-92	45-83	38-69	20-36

Pruebas en concreto de alta resistencia (89 MPa) sugiere una mayor pérdida relativa de resistencia que en el concreto normal, donde el concreto de alto desempeño que contiene humo de sílice, es la ocurrencia de desprendimiento explosivo por la temperatura, comprobándolo con una W/C de 0.26, aunque la permeabilidad es bastante baja; estableciendo que el desprendimiento es más alto cuanto más baja es la permeabilidad y más alta la rapidez del incremento de temperatura. Una observación es que en concreto saturado es mayor la pérdida de resistencia que en seco donde el contenido de humedad en el momento de aplicación de la carga es responsable de esta diferencia, ejemplo: la humedad excesiva en el momento del incendio (Neville, 1999).

El módulo de elasticidad se reduce a temperaturas que exceden 121°C, sin embargo, existe una disminución progresiva de entre 50°C y 800°C cuando el agua puede ser expulsada por el concreto, un factor podría ser la relajación de adherencias

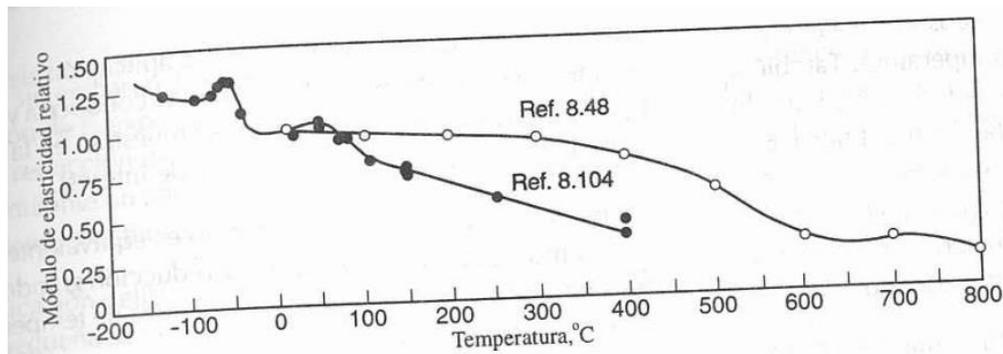


Figura 2: Influencia de la temperatura en el módulo de elasticidad (Neville, 1999)

Alrededor de los 400°C se descompone el hidróxido de calcio a manera que se deja cal a consecuencia del secado, pero la rehidratación de cal puede ser destructora si después del enfriamiento ingresa agua. Por ello, se recomienda remover dicho hidróxido mediante puzolanas en la mezcla. El tipo de agregado recomendado a usar es piedra caliza, rocas ígneas, ladrillo triturado y escoria de alto horno. Además, la grava dolomítica conduce una buena resistencia ya que, la calcinación del carbonato es endotérmica, absorbiendo el calor y dilatándolo a una elevación inicial de temperatura. El material calcinado presenta un aislamiento artificial útil en miembros grueso debido a su baja densidad. También la oxidación lenta a 150°C provoca la desintegración del agregado y posterior ruptura si el agregado presenta piritas (Neville, 1999).

La sucesión de calentamiento y carga tienen influencia en la resistencia residual, el concreto calentado bajo carga retiene la proporción más alta de su resistencia mientras que, sin carga conduce a la resistencia más baja del concreto enfriado posteriormente. El cambio de color va de rosado o rojo, entre 300 y 600°C; gris hasta 900°C y color crema arriba de los 900°C. Así la resistencia residual se puede juzgar ya que, el concreto más allá del rosado es sospechoso y más allá del gris es pulverizable y poroso (Neville, 1999).

### 2.1.2 Ondas de esfuerzos en medios elásticos.

La *velocidad de pulso* ( $V_p$ ) se define como la velocidad con la que una onda P viaja a través de un medio elástico, donde ocurren esfuerzos de compresión y tensión, las cuales viajan a través de cualquier material alcanzando una velocidad de 1.73 veces mayor a la onda S (Madariaga, 1989).

La *velocidad de corte* ( $V_s$ ) corresponde la velocidad de las ondas S denominada como secundarias y a diferencia de la velocidad de pulso, son ondas de corte, actuando de manera transversal y viajando a través de medios sólidos ya que, los líquidos no soportan esfuerzos de corte.

El *módulo de elasticidad estático* ( $E_c$ ) describe la relación entre el esfuerzo que está sometido el concreto y su deformación unitaria, representada como una pendiente. Si la relación es lineal y los esfuerzos no alcanzan el límite de proporcionalidad, el material se comporta elásticamente según la ley de Hooke (Wight & MacGregor, 2015).

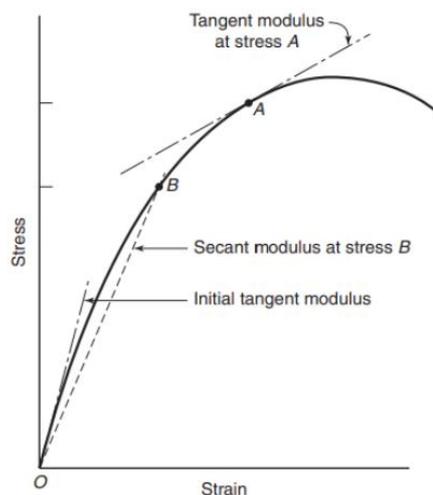


Figura 3: Módulo de elasticidad estático del hormigón (Wight & MacGregor, 2015).

El *módulo de elasticidad dinámico* ( $E_d$ ) describe una relación entre esfuerzo y deformación (rigidez) bajo condiciones dinámicas, es decir vibración, es mayormente conocido como módulo de Young (Lu et al, 2013).

### 2.1.3 Ensayos no-destructivos.

*La velocidad de pulso ( $V_p$ )* se lo determinó mediante la norma ASTM C597 donde los pulsos de ondas de tensión longitudinales son generados por un transductor electroacústico que se mantiene en contacto con una superficie del hormigón bajo prueba. Después de atravesar el hormigón, los pulsos se reciben y se convierten en eléctricos energía por un segundo transductor ubicado a una distancia  $L$  del transductor de transmisión. El tiempo de tránsito  $T$  se mide electrónicamente. La velocidad del pulso  $V$  se calcula dividiendo  $L$  por  $T$ .

*La velocidad de corte ( $V_s$ )* no cuenta con una norma ASTM que explique cómo realizar este ensayo y, por ende, se diseñó un procedimiento para calcular dicha velocidad. En un principio se utilizó un generador de pulsos conectado a través de cables a un par de transductores, los cuales a su vez se conectaron a un osciloscopio análogo pero las ondas no eran percibidas. Por ellos se planteó otro mecanismo en base a un método de impacto utilizando los mismos transductores, pero en vez del generador de pulsos se usó un martillo de acero soldado a una esfera, con el cual se daban golpes en la superficie lateral del cilindro.

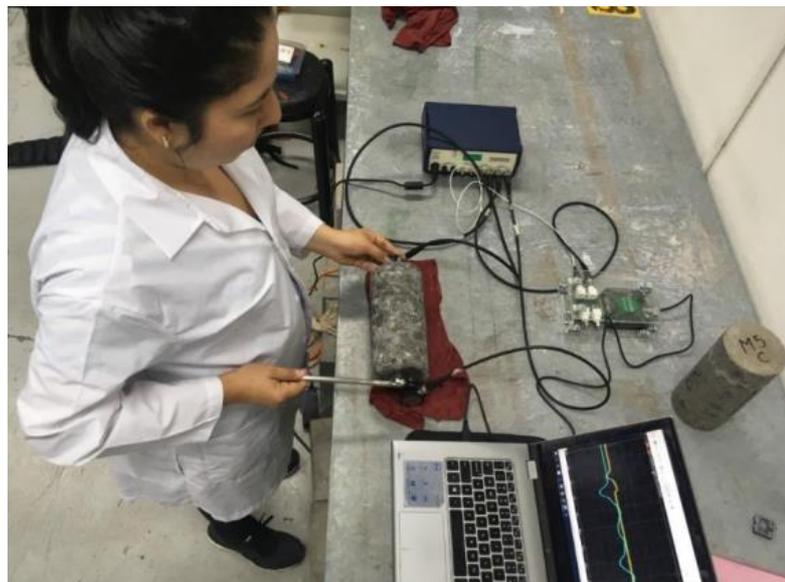


Figura 4: Mecanismo experimental para la medición de velocidad de corte (Orellana, 2020).

*El número de rebote (NR)* se lo determinó mediante la norma ASTM C805 donde un martillo de acero impacta, con una cantidad predeterminada de energía, un émbolo de metal en contacto con una superficie de hormigón. Se mide la distancia a la que rebota el martillo o se miden las velocidades del martillo antes y después del impacto. El resultado de la prueba se informa como un número de rebote adimensional.

*El módulo de elasticidad dinámico (Ed)* se lo determinó mediante la norma ASTM C215 donde se determinan las frecuencias de resonancia fundamentales utilizando uno de dos procedimientos alternativos: (1) el método de resonancia forzada o (2) el método de resonancia de impacto. Independientemente del procedimiento se utiliza para todos los especímenes de una serie asociada. En el método de resonancia forzada, una muestra soportada es forzada a vibrar por una unidad motriz electromecánica donde las frecuencias fundamentales para los tres modos diferentes de vibración se obtienen mediante ubicación adecuada del conductor y la unidad de recogida. En el método de resonancia de impacto, una muestra soportada se golpea con un pequeño impactador y la respuesta de la muestra es medido por un acelerómetro ligero en la muestra, las frecuencias fundamentales para los tres diferentes modos de vibración se obtienen mediante la ubicación adecuada del punto de impacto y el acelerómetro.

#### **2.1.4 Transporte de masa en el hormigón.**

*La tasa de absorción del agua* por hormigón de cemento hidráulico se lo determinó mediante la norma ASTM C1585 midiendo el aumento en la masa de una muestra resultante de la absorción de agua en función del tiempo cuando sólo una superficie de la muestra está expuesta al agua. El espécimen es acondicionado en un ambiente con una humedad relativa estándar para inducir una condición de humedad constante en el poro capilar del sistema. La superficie expuesta de la muestra se sumerge en el agua y la entrada de agua del hormigón insaturado está dominada por succión capilar durante el contacto inicial con el agua.

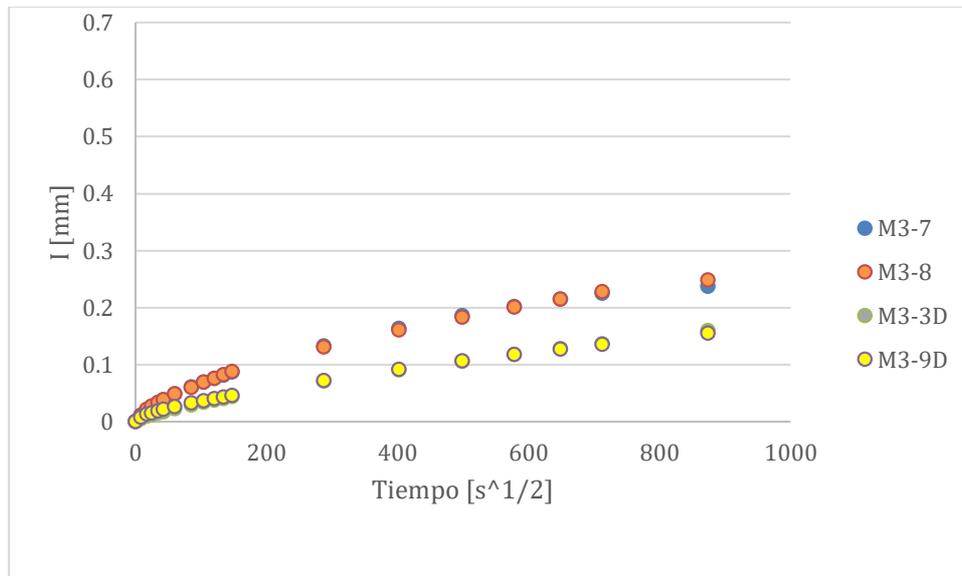


Figura 5: Resultados de la absorción inicial y secundaria de la mezcla M3 (Ayala, 2015).

$$I = \frac{m_t}{a * d}$$

Donde:

I = absorción, m

t = cambio en la masa de espécimen en gramos en el tiempo t

a = área expuesta del espécimen, en mm<sup>2</sup>

d = densidad del agua en g/mm<sup>3</sup>

El índice de permeabilidad del aire (API) no cuenta con una norma en específico, pero Schönlin y Hilsdorf (1988), describen un método que se realiza a través de una cámara de vacío, en el cual se genera vacío entre la cámara y la cara del espécimen (disco de hormigón), midiendo el tiempo en el que se da la caída de presión, el cual es el tiempo en el que fluye el aire a través del disco. De esta manera determina una medida de los poros y microgrietas existentes en el hormigón (Recalde, 2009).

$$API = \frac{(P_1 - P_0)V_s}{(t_1 - t_0) \left( P_a - \frac{P_1 + P_0}{2} \right) A} \frac{L}{A}$$

Donde:

$P_0$  = presión dentro de la cámara de vacío al comienzo de la medición [Pa]

$P_1$  = presión dentro de la cámara de vacío al final de la medición [Pa]

$P_a$  = presión atmosférica [Pa]

$t_1 - t_0$  = duración de la medición [s]

$V_s$  = volumen de la cámara de vacío [m<sup>3</sup>]

$L$  = espesor del disco [m]

$A$  = sección transversal del espécimen [m<sup>2</sup>]

### 2.1.5 Parámetro de densidad de fisuras en el hormigón.

El parámetro de densidad de fisuras ( $\varepsilon$ ) fue utilizado en la investigación doctoral de Recalde (2009), el cual cita el estudio realizado por O'Connell & Budiansky (1974), quienes suponen que todas las fisuras que se encuentran en un material homogéneo e isotrópico son planos circulares o elipsoidales distribuidos de forma aleatoria en el material. Para ello, exponen un modelo matemático con las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{V}\right) \sum a^3 \quad \boxed{\text{Fisuras planas circulares}}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{2N}{\pi V}\right) \sum \frac{A_c^3}{P_c} \quad \boxed{\text{Fisuras elipsoidales}}$$

Figura 6: Fórmulas del modelo de O'Connell & Budiansky (1974) (Rosero, 2018).

Además, el modelo describe la relación entre el parámetro de densidad de fisuras y los cambios en la relación del módulo de Poisson, compresibilidad, corte y Young como se observa en los diferentes cuadrantes de la Figura 7, observando cómo estos resultados cambian de acuerdo al estado al que se encuentren sometidos: saturado mojado y seco. Para este proyecto fue utilizado el cuadrante encerrado de color rojo porque presenta la relación con el Ed.



Se detalla el plan experimental por núcleos:

Tabla 4: Plan experimental por núcleos

Mezcla	Especimen	MOJADO DAÑADO			SECO AIRE DAÑADO		
		Vp	Vs	Ed	Vp	Vs	Ed
M3	M3A	x	x	x	x	x	x
	M3B	x	x	x	x	x	x
	M3C	x	x	x	x	x	x
M4	M4A	x	x	x	x	x	x
	M4B	x	x	x	x	x	x
	M4C	x	x	x	x	x	x
M5	M5A	x	x	x	x	x	x
	M5B	x	x	x	x	x	x
	M5C	x	x	x	x	x	x

## 2.3 Metodología

### 2.3.1 Diseño de mezclas.

En el presente trabajo experimental se fabricaron tres mezclas de hormigón denominadas M3, M4 y M5, cuyo proceso de fabricación sigue la norma ASTM C192-16 con las siguientes dosificaciones:

Tabla 5: Dosificación de la mezcla M3 (Zhindón, 2018)

MEZCLA M3		
PARA 1 m <sup>3</sup>		
W/C	0.35	
	Volumen	Peso [kg]
Agregado fino	0.1941	524.00
Agregado grueso	0.0000	0.00
Grava	0.3604	973.14
Cemento	0.2026	638.17
Aditivo	0.0041	4.53
Agua	0.2240	224.02
SUMA	1.0000	2363.85

Tabla 6: Dosificación de la mezcla M4 (Zhindón, 2018)

<b>MEZCLA M4</b>		
<b>PARA 1 m<sup>3</sup></b>		
<b>W/C</b>	0.46	
	<b>Volumen</b>	<b>Peso [kg]</b>
<b>Agregado fino</b>	0.1802	486.64
<b>Agregado grueso</b>	0.0000	0.00
<b>Grava</b>	0.3347	903.76
<b>Cemento</b>	0.1882	592.67
<b>Aditivo</b>	0.0000	0.00
<b>Agua</b>	0.2821	282.11
<b>SUMA</b>	1.0000	2265.18

Tabla 7: Dosificación de la mezcla M5 (Zhindón, 2018)

<b>MEZCLA M5</b>		
<b>PARA 1 m<sup>3</sup></b>		
<b>W/C</b>	0.6	
	<b>Volumen</b>	<b>Peso [kg]</b>
<b>Agregado fino</b>	0.1749	472.26
<b>Agregado grueso</b>	0.0000	0.00
<b>Grava</b>	0.3248	877.06
<b>Cemento</b>	0.1680	529.15
<b>Aditivo</b>	0.0000	0.00
<b>Agua</b>	0.3175	317.49
<b>SUMA</b>	1.0000	2195.96

### 2.3.2 Fabricación de especímenes y curado.

Para cada mezcla se fabricaron tres losetas de 40 x40 x 20 cm, los cuales fueron elaborados por el equipo de apoyo del laboratorio de materiales de la Universidad San Francisco de Quito, donde los especímenes se fundieron a la par con 13 cilindros de distintas dimensiones para realizar estudios paralelos. Las losas fueron desencofradas después de 24 horas de su fundición y estuvieron expuestas por 7 días a curado a estándar.

### 2.3.3 Ensayos.

A continuación, se detalla los ensayos realizados

*Tabla 8: Ensayos realizados*

ID	Nombre	Norma
Vp	Velocidad de pulso	ASTM C597
fc	Resistencia a la compresión	ASTM C39
NR	Número de rebote	ASTM C805
Ed	Módulo de elasticidad dinámico	ASTM C215
Ec	Módulo de elasticidad estático	ASTM C469
Si, Ss	Tasas de absorción inicial y secundaria	ASTM C1585
API	Índice de Permeabilidad del aire	ver sección 2.1.4
Vs	Velocidad de onda de corte	ver sección 2.1.3

### 2.3.4 Exposición a mediana temperatura.

La exposición a altas temperaturas se realizó a través de un horno no industrial compuesto por una hornilla y conexión a gas. El horno fue cubierto por ladrillos de cerámica refractarios y por lana de vidrio que permitían aislar el calor del horno. La exposición se la realizó a una temperatura de  $450^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$  por dos horas. Para luego, realizar el control de la temperatura a través de la adaptación de una termocupla a la base del horno y la programación de arduino que permitió observar la temperatura.



*Figura 8: Armado de horno no industrial para exposición a altas temperaturas (Moreno, 2018)*

### 2.3.5 Recopilación de datos.

Los datos fueron recopilados de los trabajos de titulación correspondiente a Andrea Moreno, Romina Ayala, Iván Paredes, Ana María Zhindón y Sabine Orellana.

Tabla 9: Trabajos de titulación

Fecha de publicación	Autor	URI
2020	Sabine Orellana	<a href="http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/9140">http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/9140</a>
2020	Iván Paredes	<a href="http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/8832">http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/8832</a>
2018	Ana María Zhindón	<a href="http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7997">http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7997</a>
2018	Andrea Moreno	<a href="http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7784">http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7784</a>

## 2.4 Resultados

### 2.4.1 Características del hormigón.

Tabla 10: Especímenes sin daño

	M3	M4	M5
w/c	0.35	0.45	0.60
fc_28d [MPa]	52.2	35.1	32.9
fc_obra [MPa]	56.1	37.5	32.8
S_inicial [mm/s <sup>1/2</sup> ]	6.00E-04	1.50E-03	1.80E-03
S_secondary [mm/s <sup>1/2</sup> ]	2.00E-04	1.00E-04	2.50E-04
API [m <sup>2</sup> /s]	1.39E-06	4.55E-06	3.90E-06

Fuente (Zhindón, 2018)

Fuente (Ayala, 2019)

### 2.4.2 Losas.

Tabla 11: Velocidad de pulso

	Vp, m/s	SKD_u	DRY_u	DMG	SKD'_d	DRY'_d
M3	M3A	4,157	4,002	4,041	4,184	4,167
	M3B	4,121	3,952	4,186	4,158	4,257
	M3C	4,151	3,991	4,079	4,125	4,169
M4	M4A	3,776	3,698	3,531	3,756	3,802
	M4B	3,841	3,726	3,996	3,737	4,006
	M4C	3,782	3,683	3,681	3,742	3,655
M5	M5A	3,824	3,662	3,597	3,688	3,650
	M5B	3,782	3,610	3,669	3,743	3,608
	M5C	3,898	3,676	3,659	3,800	3,669

Fuente (Paredes, 2020)

Fuente (Moreno, 2018)

Tabla 12: Velocidad de corte

	Vs, m/s	SKD_u	DRY_u	DMG	SKD'_d	DRY'_d
M3	M3A	2,582	2,396	2,857	2,500	2,468
	M3B	2,501	2,333	2,778	2,601	2,324
	M3C	2,511	2,329		2,891	2,436
M4	M4A	2,226	2,228	2,939	2,022	2,128
	M4B	2,250	2,200	2,815	2,599	2,253
	M4C	2,244	2,172	3,513	4,377	3,754
M5	M5A	2,203	2,276	2,729	3,993	3,667
	M5B	2,234	2,261	2,457	3,488	3,664
	M5C	2,313	2,271	2,719	3,564	3,444

Fuente (Paredes, 2020)

Fuente (Moreno, 2018)

Tabla 13: Número de rebote

	NR	SKD_u	DRY_u	DMG	SKD'_d	DRY'_d
M3	M3A	42	42	50	50	50
	M3B	39	41	50	50	49
	M3C	41	42	49	50	50
M4	M4A	35	37	48	49	48
	M4B	34	36	49	47	47
	M4C	36	37	36	35	37
M5	M5A	41	39	39	39	39
	M5B	39	40	40	39	39
	M5C	40	41	41	40	40

Fuente (Paredes, 2020)

Fuente (Moreno, 2018)

Tabla 14: Módulo de elasticidad dinámico

	Ed, GPa	SKD_u	DRY_u	DMG	SKD'_d	DRY'_d
M3	M3A	40.0	33.6		36.9	37.2
	M3B	38.1	32.1		39.5	38.9
	M3C	38.3	32.3			
M4	M4A	29.7	28.2		24.6	28.4
	M4B	30.8	27.6		35.5	33.5
	M4C	30.1	27.2	-187.4	328.3	742.7
M5	M5A	29.4	29.1	26.9	382.8	3,388.4
	M5B	29.8	28.5	28.7	-106.7	1,110.1
	M5C	31.8	29.1	29.2	-134.1	-122.0

Fuente (Paredes, 2020)

Fuente (Moreno, 2018)

Tabla 15: Parámetro de densidad de fisuras

	$\epsilon$	Por losa	Por mezcla
M3	M3A	0.125	0.146
	M3B	0.168	
	M3C	0.146	
M4	M4A	0.050	0.075
	M4B	0.098	
	M4C	0.076	
M5	M5A	0.109	0.102
	M5B	0.095	
	M5C	0.102	

Fuente (Moreno, 2018)

Tabla 16: Masa

	Masa, kg	SKD_u	DRY_u	DMG	SKD'_d	DRY'_d
M3	M3A	81.0	76.8	75.7	78.8	77.5
	M3B	80.6	76.6	75.6	77.5	77.1
	M3C	80.2	76.7	76.0	79.2	77.5
M4	M4A	77.7	74.7	75.0	78.6	74.7
	M4B	78.7	74.0	74.6	76.3	77.2
	M4C	77.9	74.9	67.2	81.7	76.3
M5	M5A	77.6	75.7	70.3	78.4	73.5
	M5B	77.5	75.8	69.5	78.1	74.0
	M5C	77.5	75.7	71.4	78.4	74.8

Fuente (Paredes, 2020)

Fuente (Moreno, 2018)

### 2.4.3 Núcleos.

Tabla 17: Velocidad de pulso (Orellana, 2020)

	Vp, m/s	SKD'_d	DRY'_d
M3	M3A	4,280	4,253
	M3B	4,344	4,322
	M3C	4,313	4,389
M4	M4A	3,926	3,885
	M4B	4,085	4,077
	M4C	4,009	3,999
M5	M5A	3,718	3,780
	M5B	3,764	3,752
	M5C	3,870	3,878

Tabla 18: Velocidad de corte (Orellana, 2020)

	Vs, m/s	SKD'_d	DRY'_d
M3	M3A	3,050	3,710
	M3B	3,288	5,958
	M3C	2,851	4,111
M4	M4A	2,613	3,932
	M4B	3,298	4,474
	M4C	2,401	2,945
M5	M5A	2,639	3,065
	M5B	2,368	3,041
	M5C	3,279	3,915

Tabla 19: Módulo de elasticidad dinámico (Orellana, 2020)

	Ed, GPa	SKD'_d	DRY'_d
M3	M3A	29.7	29.0
	M3B	30.0	28.9
	M3C	30.8	29.5
M4	M4A	22.7	19.7
	M4B	26.7	24.5
	M4C	25.1	22.9
M5	M5A	19.7	18.1
	M5B	18.9	16.7
	M5C	20.7	19.4

Tabla 20: Parámetro de densidad de fisuras (Orellana, 2020)

	$\epsilon$	DMG
M3	M3A	0.023
	M3B	0.007
	M3C	0.040
M4	M4A	0.117
	M4B	0.076
	M4C	0.081
M5	M5A	0.075
	M5B	0.105
	M5C	0.059

## 2.5 Análisis de resultados

### 2.5.1 Características del hormigón.

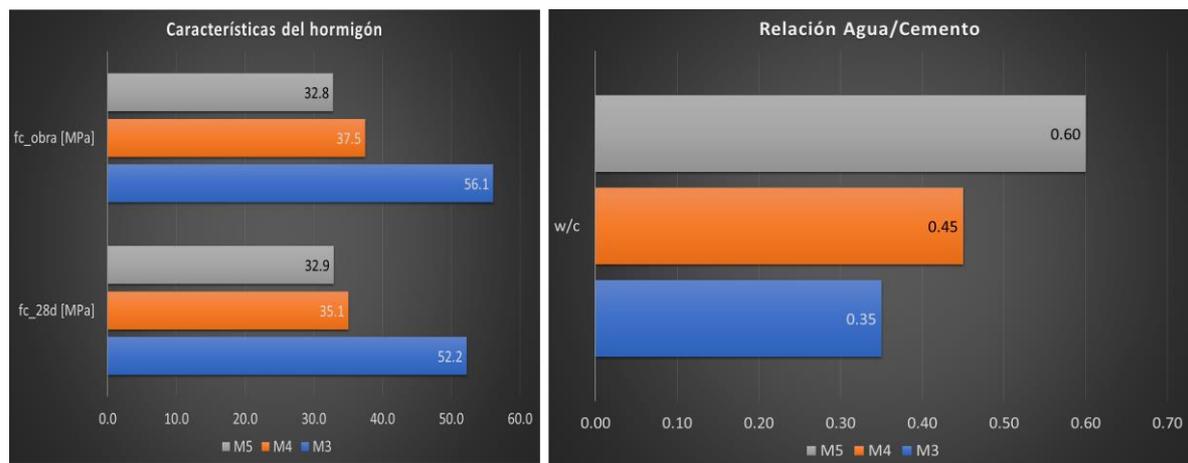


Figura 9: Detalle del hormigón (Zhindón, 2018)

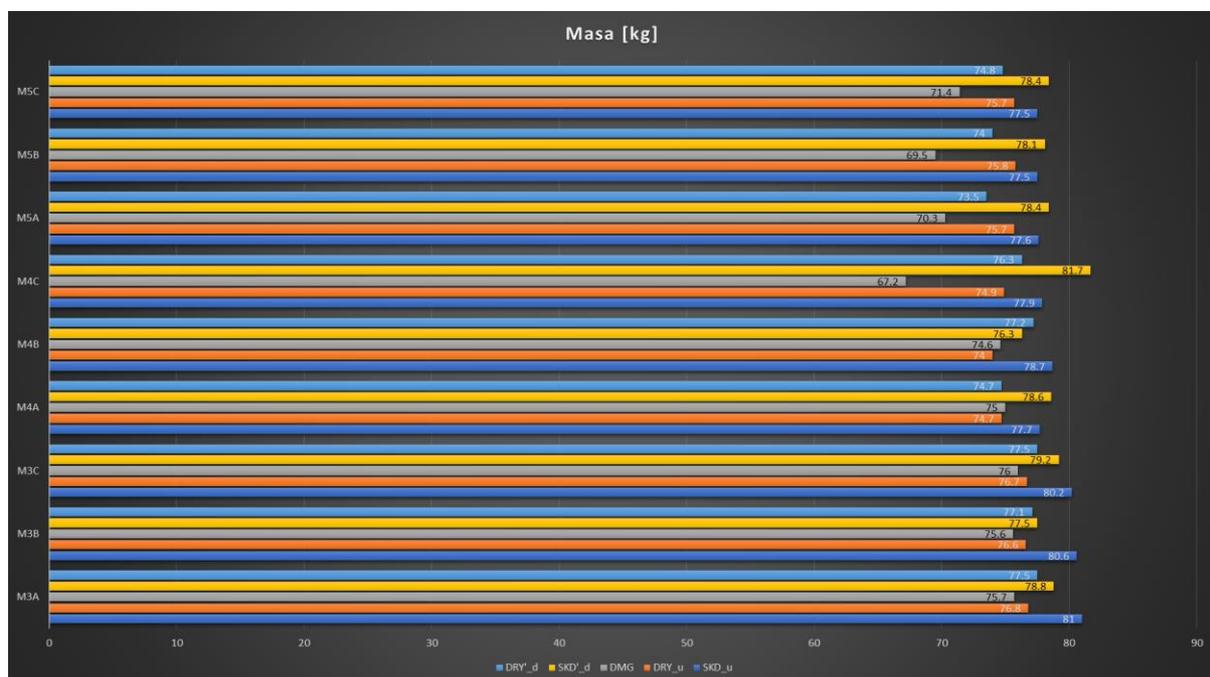


Figura 10: Masa de las mezclas (Moreno, 2018), (Paredes, 2020)

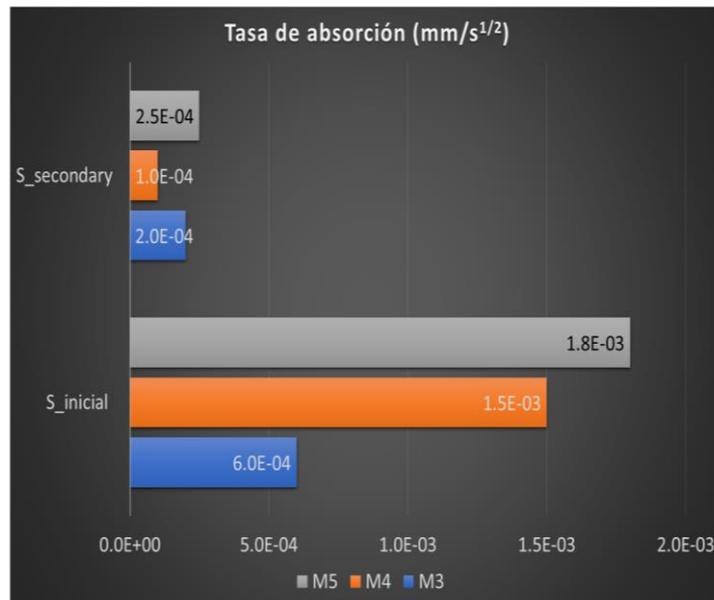


Figura 11: Tasa de absorción (Ayala, 2019)

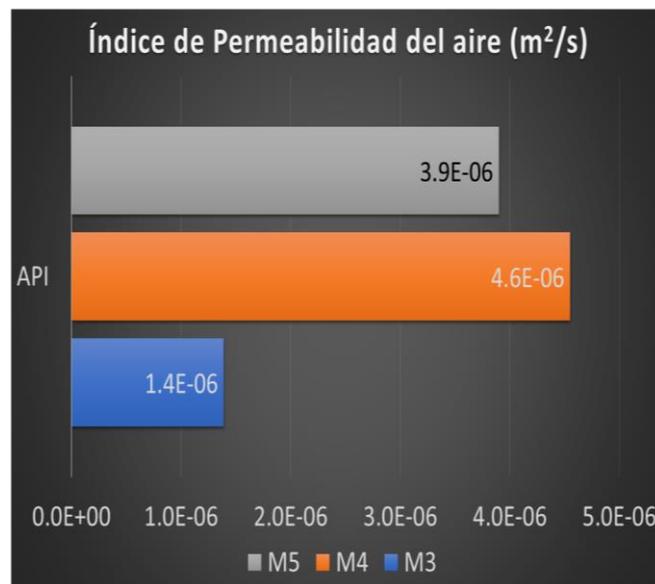


Figura 12: Índice de permeabilidad del aire (Ayala, 2019)

La resistencia a compresión del hormigón es directamente proporcional a las mezclas M5, M4 y M3 mientras que, la relación W/C decrece a partir de la mezcla M5. Dicho esto, la tasa de absorción inicial en la mezcla M3 es bastante pequeño, se podría decir hasta tortuoso debido a la microestructura de los capilares, mientras que en el secundario básicamente las mezclas tienen la misma tasa de absorción.

Con respecto al índice de permeabilidad del aire, la mezcla M4 es más poroso, es decir tiene mayor permeabilidad que los demás, además de ser muy parecido a la mezcla M5 ya que, las resistencias a la compresión también son muy cercanos mientras que el valor más bajo corresponde a la mezcla M3.

### 2.5.2 Losas.

Para cada mezcla se fabricaron tres losetas de 40 x40 x 20 cm con un total de 3 mezclas y 9 losas. En los gráficos se muestra el promedio de tres losas para cada mezcla. Dicho esto, a las losas se las dividió en 10 puntos, en los cuales se hizo las distintas mediciones tanto antes como después de la exposición a altas temperaturas.

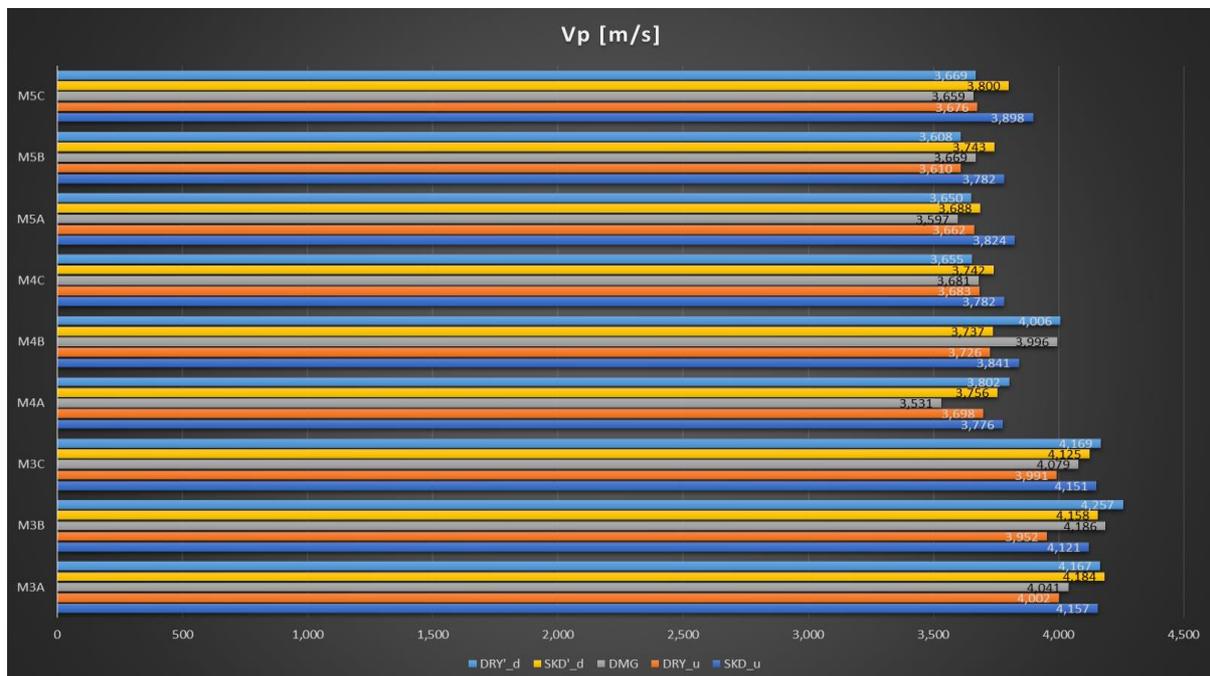


Figura 13: Velocidad de pulso (Moreno, 2018), (Paredes, 2020)

Según el gráfico, las mezclas en estado mojado son mayores que el seco antes del daño que es lo que se esperaba, pero después del daño se esperaba que todos bajen y eso se cumple en 4 de ellos (M5 y M4C) después de que están dañados. Una vez dañados se los vuelve a mojar y a secar, comportándose al revés.

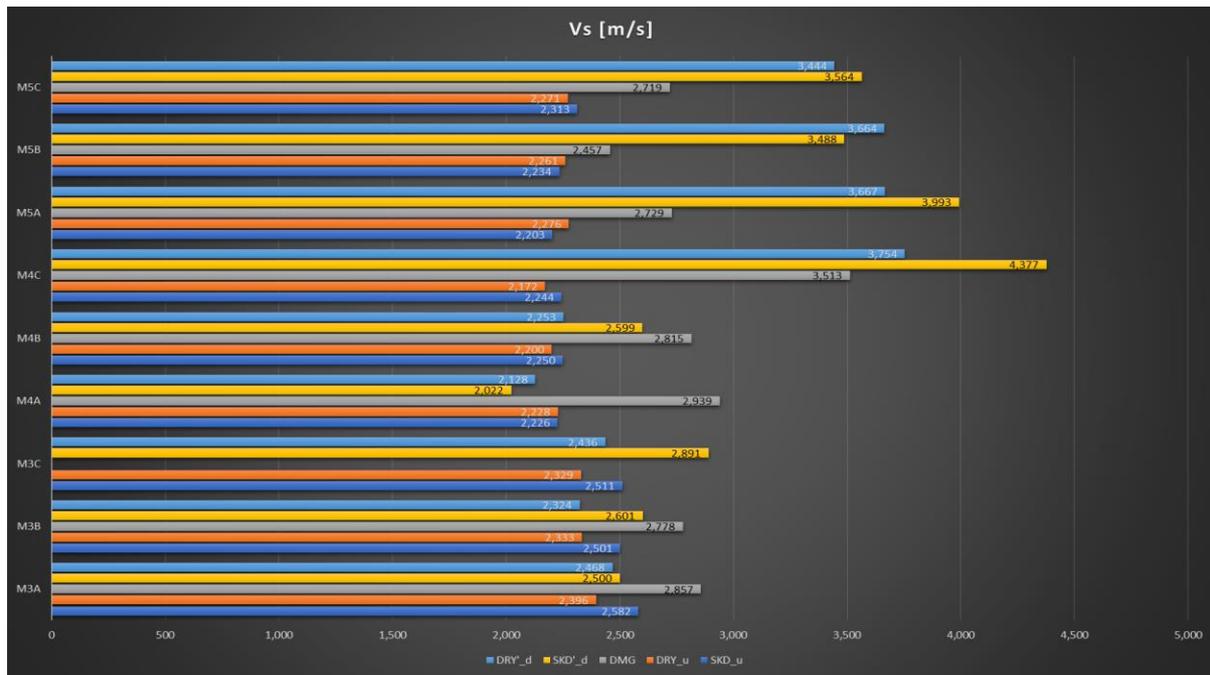


Figura 14: Velocidad de corte (Moreno, 2018), (Paredes, 2020)

La velocidad de corte se midió con la norma ASTM C215 en 10 puntos utilizando un circuito de conducción conformado por un oscilador de frecuencia variable, generando la resonancia de ondas transversales mediante transductores capaces de enviar y recibir señal.

De esta manera, se cumple que las mezclas en estado mojado son mayores que el seco antes del daño en las mezclas M3, M4 y M5C; pero después de estar sometido al daño se tiene valores demasiado altos.

Comparando el gráfico con la velocidad de pulso donde no hay mucha diferencia después del daño, ocurre todo lo contrario con respecto a la velocidad de corte ya que inclusive aumenta.

En estado mojado y seco después del daño, la velocidad de corte es mayor a la velocidad de pulso, por lo tanto, se puede deducir que el método utilizado para la obtención de la velocidad de corte después de la exposición a altas temperaturas es muy sensible y el impacto inicial para la creación del impulso de la onda transversal no es constante.

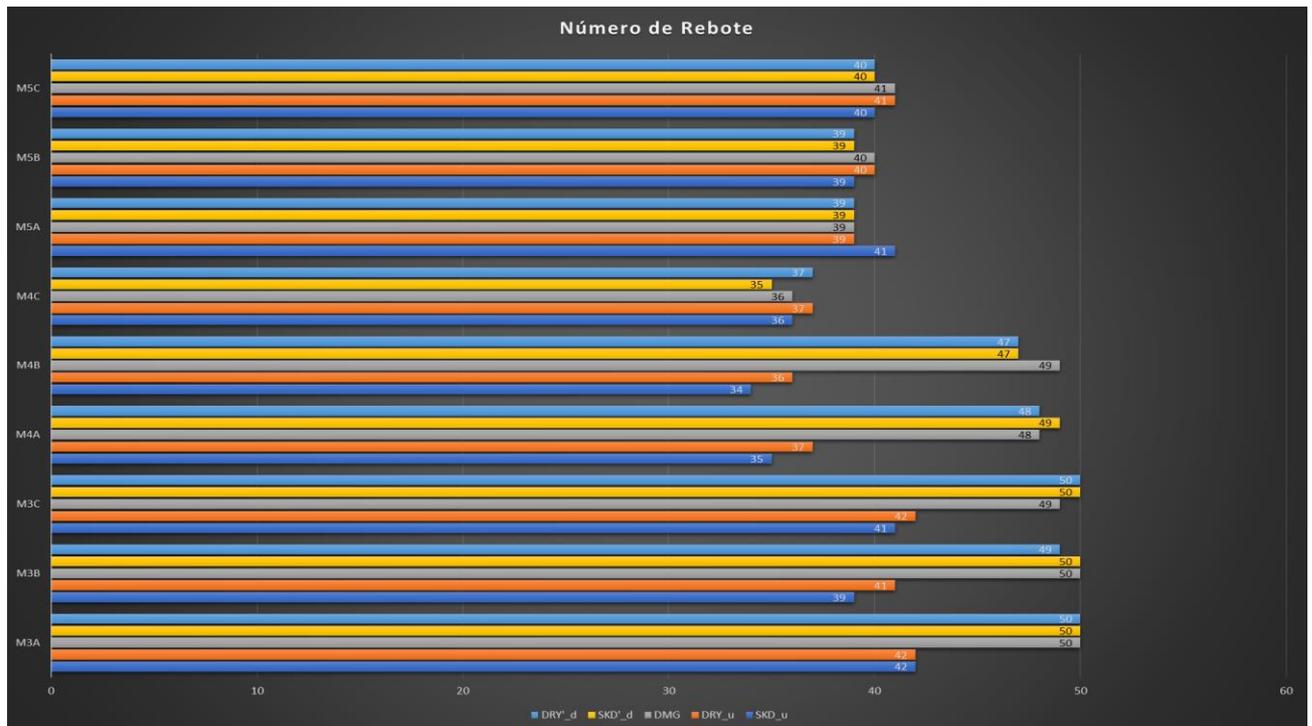


Figura 15: Número de rebote (Moreno, 2018), (Paredes, 2020)

Para el número de rebote se midió en 12 puntos de la losa, 3 puntos por cada una de las caras laterales de la losa, donde después del daño incrementaron debido a que pudo darse que una capa de la superficie se hizo más rígida en las mezclas M4 y M3.



Figura 16: Módulo de elasticidad dinámico (Moreno, 2018), (Paredes, 2020)

El módulo de elasticidad dinámico se lo obtuvo en base de la relación entre la velocidad de pulso y la velocidad de corte para las losas tras exposición a altas temperaturas, en estado mojado y seco al aire. Del gráfico el que mejor se comporta son las mezclas M3A, M3B y M3C

debido a que, las demás mezclas presentan valores incoherentes ya que, se puede observar que los módulos de elasticidad dinámicos son extremadamente grandes; esto se debe a que, considerando la ecuación, los módulos de elasticidad dependen tanto de la velocidad de corte.

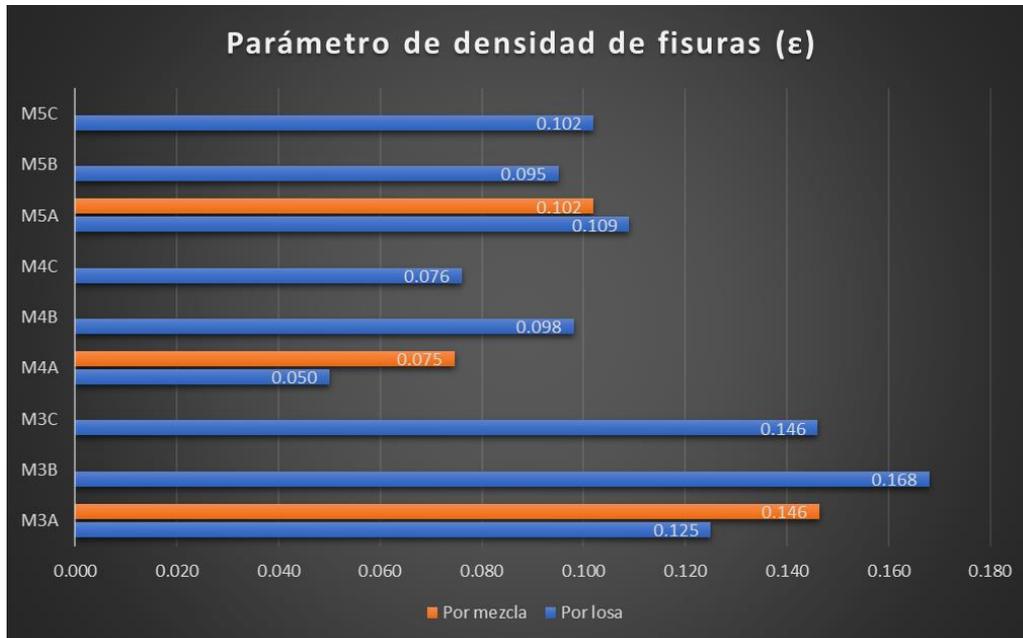


Figura 17: Parámetro de densidad de fisuras (Moreno, 2018)

El parámetro de densidad de fisuras, se lo obtuvo a través de la relación existente entre la velocidad de pulso y la velocidad de corte en cada uno de los puntos de cada una de las losas para cada una de las mezclas. Esto fue posible a través de ensayos no destructivos mediante ondas de esfuerzo de  $V_s$  y  $V_p$ . Sin embargo, después de obtener los resultados preliminares de la velocidad de corte tras la exposición a altas temperaturas se observó que no es posible determinar un módulo de elasticidad dinámico, debido a que la onda de corte proporcionó valores mayores a la onda de velocidad de pulso. Por lo que se puede decir que los valores de la velocidad de corte tras la exposición a altas temperaturas no son confiables.

### 2.5.3 Núcleos.

Estos núcleos se extrajeron de 3 losas con diferente relación agua cemento (M3, M4 y M5), las mismas fueron sometidas a daño, a altas temperaturas.

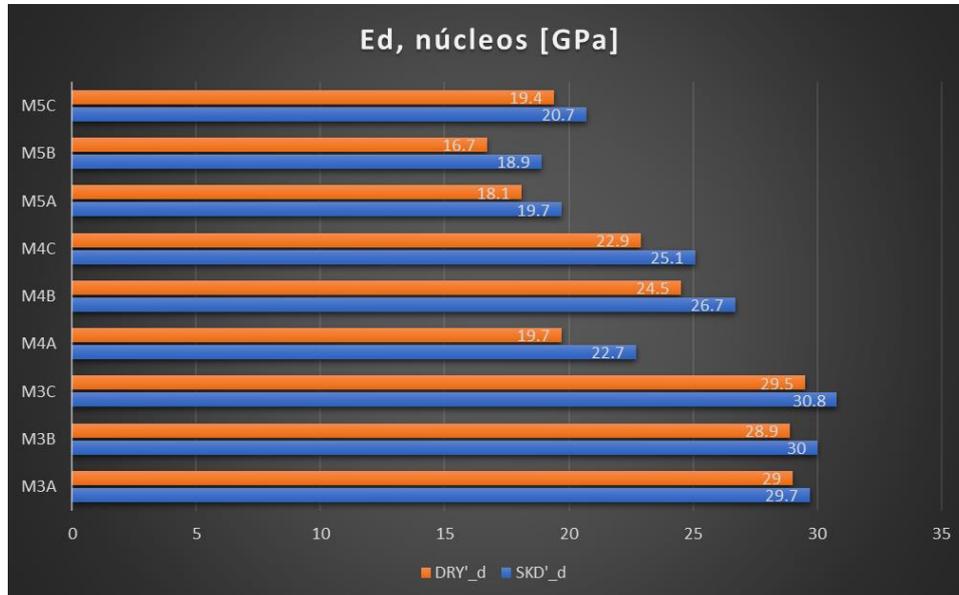


Figura 18: Módulo de elasticidad dinámico (Orellana, 2020)

El módulo de elasticidad dinámico se obtuvo mediante dos métodos diferentes. El primero correspondía a la norma ASTM C215 que se basa en un procedimiento de impacto a los núcleos y el segundo, a la relación entre  $V_p$  y  $V_s$  obtenidos mediante ondas de esfuerzo.

Fue necesario un correcto cálculo del módulo de elasticidad dinámico ya que es el dato principal para la estimación del parámetro de densidad de fisuras.

Los resultados de  $E_d$  calculados por ambos métodos debían arrojar resultados similares entre ellos, lo cual no pasó. Por ende, los resultados más confiables fueron en base a la norma.

La gráfica muestra los valores de  $E_d$  para estado seco y mojado después del daño, observando que para estado mojado el  $E_d$  es mayor que para estado seco, lo cual obedece al modelo matemático de O'Connell & Budiansky.

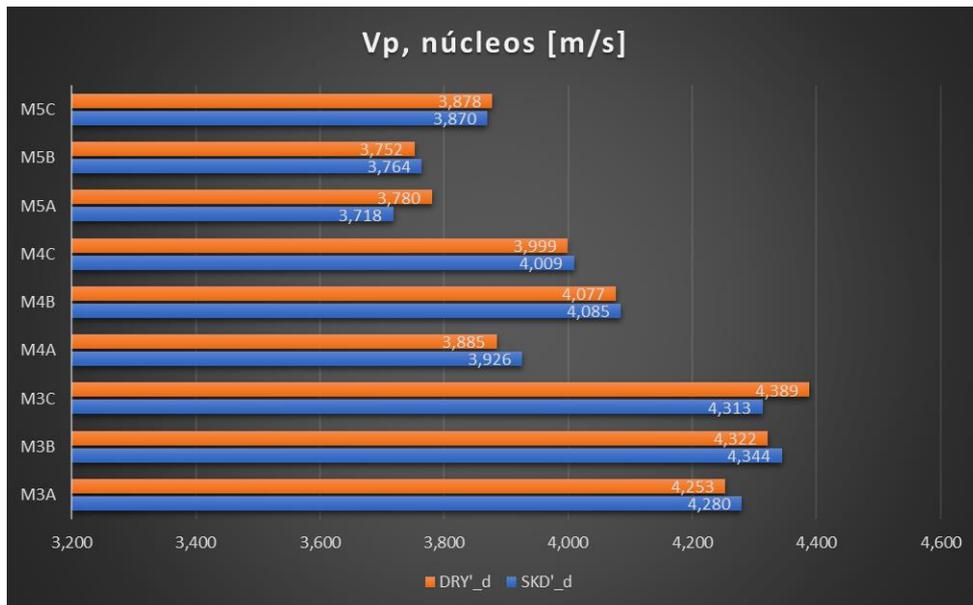


Figura 19: Velocidad de pulso

En el gráfico, se observa una coherencia entre los datos entre núcleos y dentro del mismo núcleo. Además, existe una tendencia que a menor relación agua/cemento la velocidad de pulso es mayor. De esta forma, los valores de  $V_p$  para cada núcleo son precisos ya que tienden a ser similares dentro de su propia mezcla. Por ejemplo,  $V_p$  para estado mojado de la mezcla M5 está en un rango entre 3718 m/s y 3870 m/s;  $V_p$  de mezcla M4 entre 3926 m/s a 4085 m/s; y  $V_p$  de mezcla M3 entre 4280 m/s y 4344 m/s.

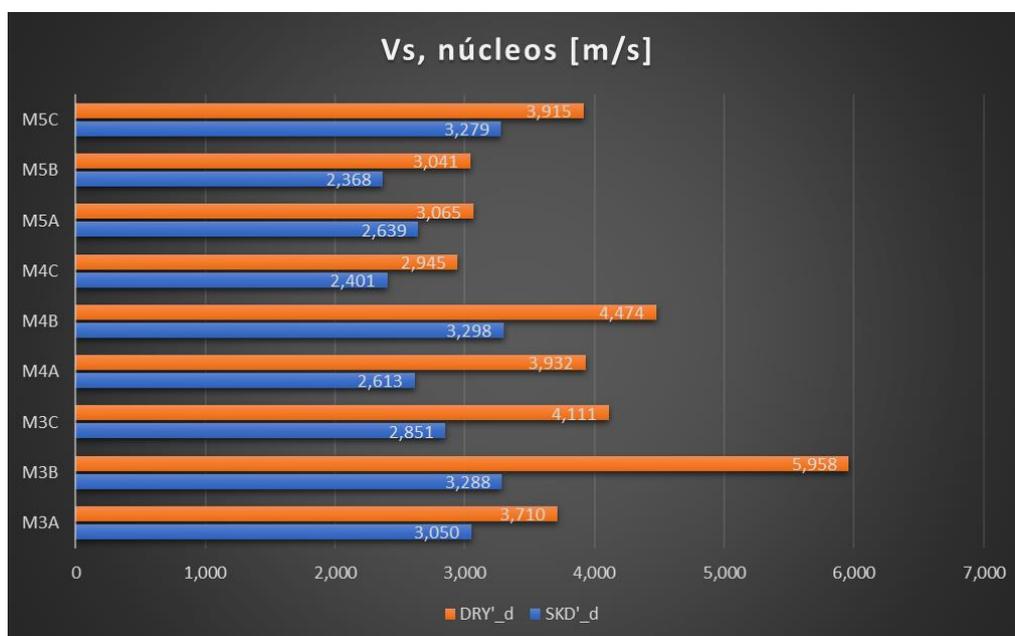


Figura 20: Velocidad de corte

En este gráfico, se observa que no existe coherencia entre los datos ya que, principalmente en estado seco estos valores no obedecen una tendencia. Además, no se observa precisión dentro de la mezcla, ya que existen valores o muy altos o muy bajos

Por otra parte, se observa que los valores para  $V_p$  son mayores que los de  $V_s$ , deduciendo que los mismos son confiables ya que obedecen la teoría de que la onda de pulso es más rápida que la onda de corte en estado mojado

Sin embargo, se observa que no existe precisión entre los datos de velocidad de corte y que no se obedece la teoría de que la onda de pulso tiene mayor velocidad que la onda de corte en estado seco. Por ejemplo, en los núcleos M5C, M4A, M4B y M3B los valores de  $V_s$  son mayores a  $V_p$ . Al contradecir la teoría provoca que no sean confiables, con respecto a la condición seca después del daño.

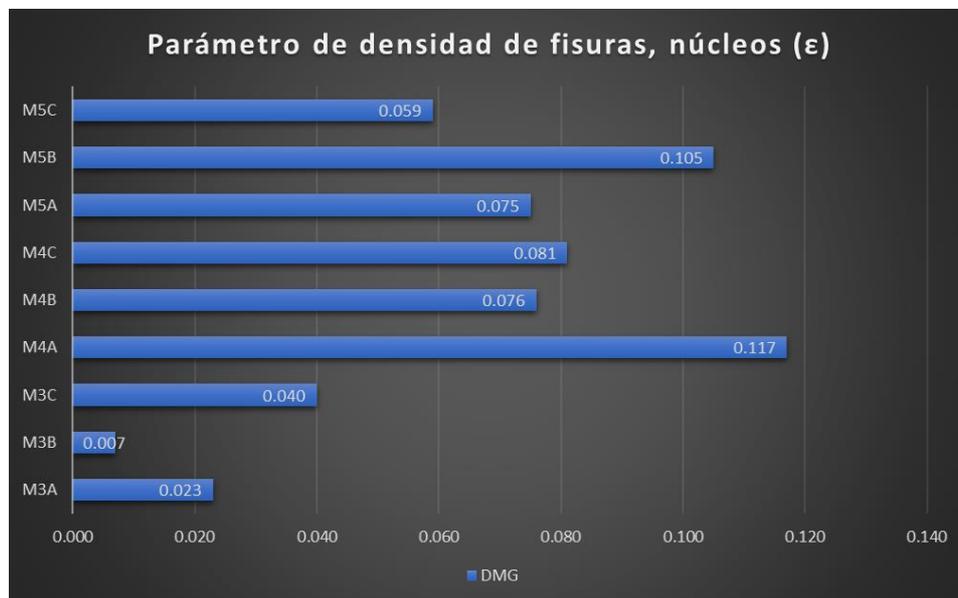


Figura 21: Parámetro de densidad de fisuras

El parámetro densidad de fisuras fue calculado a partir del módulo de elasticidad dinámico según la norma ASTM C215 mediante el modelo O'Connell & Budiansky

Para estos resultados, en el trabajo de titulación de Sabine Orellana (2020), se comparó los métodos en relación a  $V_p$ - $V_s$  y ASTM C215, obteniendo para estado mojado resultados confiables, pero para estado seco no existía ninguna similitud. Por lo tanto, se determinó que

los valores de módulo de elasticidad dinámico conseguidos mediante la fórmula que integra  $V_p$  y  $V_s$  no son confiables. Por esta razón se descartó su uso para la estimación del parámetro de fisuras.

En un principio se utilizó un generador de pulsos conectado a través de cables a un par de transductores, los cuales a su vez se conectaron a un osciloscopio, pero debido a que las ondas de pulso no eran percibidas por el osciloscopio se planteó un mecanismo basado en impacto, utilizando los mismos transductores, pero en vez del generador de pulsos se usó un martillo de acero soldado a una esfera, con el cual se daban golpes en la superficie lateral del cilindro. El osciloscopio registró dos ondas de pulso: el percibido en el transductor de entrada y el percibido en el transductor de salida. Para evitar la pérdida de humedad de los núcleos mojados se colocaba el espécimen sobre un pedazo de tela grueso mojado.

Obteniendo según la gráfica, resultados bajos ya que se esperaban valores mayores a 0.2 porque de acuerdo a la teoría este parámetro de densidad de fisura debe ser mayor en elementos dañados; resultando que la mezcla con menos fisuras sea M3.

## **2.6 Propuesta de metodología de campo para estimar el parámetro de densidad de fisuras**

En función de lo que se vio en la sección 2.4 y 2.5, se observó que la medición de la velocidad de corte no fue confiable y por lo tanto estimar el módulo de elasticidad dinámico a través de la velocidad de pulso y velocidad de corte no es recomendable. Sin embargo, se observó que sí se puede obtener núcleos y de ellos sí se puede estimar el módulo de elasticidad dinámico usando la norma ASTM C215. En función de estos hallazgos, se propone la metodología que se presenta en el apéndice A.

## 2.7 Conclusiones y Recomendaciones

### 2.7.1 Conclusiones.

La idea original era medir la velocidad de pulso y velocidad de corte en una viga cualesquiera con el objetivo de saber que tan microfisurado se encuentra después de un evento de carga cíclica como un sismo o cualquier otro evento ya que, de esa forma puedo obtener el módulo de elasticidad dinámico en estado seco y mojado, desarrollando un aparato que pueda medir el  $E_d$  sin tener que asumir un módulo de poisson pero de lo que hemos analizado no es factible y sobre todo la velocidad de corte mediante transductores no son confiables. Entonces parecería que para evaluar esto, vamos a tener que extraer núcleos para luego ensayarlos y obtener el  $E_d$  mediante la norma ASTM C215 en estado mojado y seco para finalmente obtener el parámetro de densidad de fisuras lo cual resulta de toda esta investigación, descartando  $V_p$  y  $V_s$  tanto en sitio como en los cilindros y núcleos. Concluyendo lo siguiente:

- a) Con los equipos usados en el transcurso de los ensayos no fue posible optar por la velocidad de pulso y corte en estado mojado y seco.
- b) Realizar la medición de la velocidad de corte después del daño no fue posible.
- c) Los datos obtenidos a través del módulo de elasticidad dinámico por  $V_p$  y  $V_s$  no son confiables.
- d) Los datos de  $E_d$  medidos a través de núcleos mediante el ASTM C215 fueron los esperados.
- e) Se pudo obtener el parámetro de densidad de fisuras a través de la medición del  $E_d$  antes del daño en losas, pero no se pudo obtener después del daño, sin embargo, en núcleos después del daño si se pudo obtener.
- f) En el API se vio un autogenous healing después del daño.

- g) La tasa de absorción del agua se observó que las mezclas M3 tenía menor absorción que las demás mezclas.
- h) Debido a que los resultados de  $V_p$  si fueron confiables tanto para estado mojado como para estado seco, se recomienda analizar el parámetro de densidad de fisuras solo con el valor  $V_p$  y asumiendo un valor de Poisson.
- i) A partir de los datos de módulo de elasticidad dinámico en estado seco y mojado, se pudo determinar el parámetro de densidad de fisuras. De esta forma, sí es factible estimar el parámetro de densidad de fisuras en hormigón sano, midiendo la velocidad de pulso y la velocidad de onda de corte en estado seco y mojado, pero se debe buscar otro método para obtener las mediciones de velocidad de onda corte, ya que el método de los transductores fue insuficiente.

### **2.7.2 Recomendaciones.**

Después de realizar este trabajo de investigación se recomienda lo siguiente:

- a) Considerar un método que proporcione mayor energía de impacto con mayor longitud de onda. Dicho esto, es complicado ya que si hay un evento dañino y quiere medir en el campo no va a poder hacerlo, no es confiable a través de  $V_p$  y  $V_s$ , pero algo que está recién construido si se va a poder medir.
- b) Desarrollar nuevos métodos para la determinación de  $V_s$  que impliquen aparatos transductores más sensibles y técnicas de impacto más precisas.
- c) Explorar o utilizar otro tipo de medidores de velocidad de corte.
- d) Explorar el hacer el mojado a través de saturación en vacío.
- e) Explorar el secado con secado al horno.

## APÉNCIDE A: METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EL PARÁMETRO DE DENSIDAD DE FISURAS EN CAMPO

Los siguientes procedimientos describen el método para determinar el parámetro de densidad de fisuras ( $\epsilon$ ) de núcleos de hormigón, con recomendaciones. El propósito es proporcionar una guía para el futuras investigaciones e investigaciones forenses. El análisis se basa en los resultados de O'Connell y Budiansky (1974) sobre medios agrietados, aplicado a las diferencias en el módulo de corte dinámico ( $G_d$ ) de discos de hormigón seco y húmedo. El módulo de cizallamiento dinámico se puede obtener utilizando el método desarrollado por Leming, Nau y Fukuda (1997), que se basa en Hutchinson (1979) solución para la vibración axisimétrica de placas circulares libres gruesas. Un valor de  $\epsilon$  puede ser determinado si el módulo de cortante del hormigón húmedo ( $G_{húmedo}$ ) es mayor que el módulo de cortante de hormigón seco ( $G_{seco}$ ).

- 1) Identificar la ubicación que fue afectada mediante el número de rebote siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C805 donde un martillo de acero impacta con una cantidad predeterminada de energía hacia una superficie de hormigón.
- 2) Realizar una extracción de al menos tres núcleos de al menos un diámetro mínimo de 94 mm y cuya longitud debe estar entre 1.9 y 2.1 veces el diámetro usando la norma ASTM C42, mediante un equipo de perforación compuesto principalmente por una broca con punta de diamante. La perforación debe realizarse en sentido perpendicular a la superficie donde la máquina constantemente debe liberar agua.
- 3) Una vez que se obtuvieron los núcleos de hormigón, se los ingresa al mismo tiempo en un tanque de curado saturado en hidróxido de calcio a 23°C.

- 4) Una vez obtenidos todos los especímenes debe mantenerse condiciones de humedad, para lo cual se recomienda colocarlos en bolsas plásticas o contenedores no absorbentes.
- 5) Otra forma de evitar la pérdida de humedad de los núcleos mojados es colocar el espécimen sobre un pedazo de tela grueso mojado.
- 6) Al terminar se realiza un acondicionamiento en seco, el cual consistió en dejar los especímenes secarse al aire libre, es decir, a temperatura ambiente de laboratorio.
- 7) Obtener el módulo de elasticidad dinámico con la norma C215 en estado mojado y seco.
- 8) Calcular el parámetro de densidad de fisuras de los núcleos:

- i. Suponiendo que el concreto húmedo se comporta de manera similar a un medio agrietado saturado, y que el concreto secado al aire se comporta como un medio seco agrietado, entonces  $\xi_{OB}=1$  para condiciones húmedas y  $\xi_{OB}=0$  para condiciones secas. Las ecuaciones resultantes están dadas por la ecuación. D.3 a la ecuación. D.6.

$$\frac{G_{dry}}{G_0} = 1 - \frac{32}{45}(1 - \nu_{dry}) \left[ 1 + \frac{3}{(2 - \nu_{dry})} \right] \varepsilon \quad (D.3)$$

$$\frac{G_{wet}}{G_0} = 1 - \frac{32}{45}(1 - \nu_{wet}) \left[ \frac{3}{(2 - \nu_{wet})} \right] \varepsilon \quad (D.4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{dry} = \frac{45(\nu_0 - \nu_{dry})}{16(1 - \nu_{dry}^2)} \frac{(2 - \nu_{dry})}{[(1 + 3\nu_0)(2 - \nu_{dry}) - 2(1 - 2\nu_0)]} \quad (D.5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{wet} = \frac{45(\nu_0 - \nu_{wet})}{16(1 - \nu_{wet}^2)} \frac{(2 - \nu_{wet})}{(2\nu_0 - 1)} \quad (D.6)$$

- ii. Los valores para  $\nu_{seco}$  y  $\nu_{húmedo}$  se obtienen obteniendo un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas dividiendo la Ec. D.3 por la ecuación. D.4, y equiparando  $\varepsilon_{seco} = \varepsilon_{húmedo}$  con Eq. D.5 y Eq. D.6. El sistema de ecuaciones resultante viene dado por la Ec. D.7 y D.8, respectivamente. Un valor de  $\nu_0$  debe

asumirse; en esta investigación  $\nu_0$  se estimó a partir de la relación de Poisson de concreto húmedo y seco. Si no se va a medir la relación dinámica de Poisson, el valor se supone que determina  $\Omega_0$  debería ser usado. Una solución válida requiere que  $0 < \nu_{seco} < \nu_{mojado} < 0,5$ , ya que puede existir más de una solución.

$$\frac{G_{dry}}{G_{wet}} = \frac{1 - \frac{32}{45}(1 - \nu_{dry}) \left[ 1 + \frac{3}{(2 - \nu_{dry})} \right]}{1 - \frac{32}{45}(1 - \nu_{wet}) \left[ \frac{3}{(2 - \nu_{dry})} \right]} \quad (D.7)$$

$$\frac{(\nu_0 - \nu_{dry})}{(1 - \nu_{dry}^2)} \frac{(2 - \nu_{dry})}{[(1 + 3\nu_0)(2 - \nu_{dry}) - 2(1 - 2\nu_0)]} = \frac{(\nu_0 - \nu_{wet})}{(1 - \nu_{wet}^2)} \frac{(2 - \nu_{wet})}{[2(2\nu_0 - 1)]} \quad (D.8)$$

- iii. El parámetro de densidad de fisura se puede evaluar usando la Ec. D.5 o Eq. D.6 con los valores encontrados para  $\nu_{seco}$  o  $\nu_{húmedo}$ , respectivamente. Entonces se puede obtener un valor de  $G_0$  a partir de Eq. D.3 o Eq. D.4. En esta disertación, se encontró una solución mediante la implementación de un procedimiento de optimización para encontrar los valores de  $\nu_{seco}$ ,  $\nu_{húmedo}$  y  $G_0$ , tales que  $\varepsilon_{seco} = \varepsilon_{húmedo}$  y  $0 < \nu_{seco} < \nu_{mojado} < 0,5$ .

Nota: Si las muestras estarán sujetas a cambios microestructurales (es decir, daño o curación), una vez un valor para  $G_0$  se conoce,  $\varepsilon$  después de los cambios ( $\varepsilon_i$ ) se puede determinar calculando  $\nu_{seco, i}$  por combinando Eq. D.3 y Eq. D.4, y evaluando  $\varepsilon$  usando la Ec. D.4 solamente. Este método tiene la conveniencia de utilizar la medición en seco para determinar los valores de  $\varepsilon_i$  después de los cambios (Recalde, 2009).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C1202-17a. (2017). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM International. West Conshohocken. PA. 1-8p.
- ASTM E 1876 – 01. (2001). Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration
- ASTM C1585-13. (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM International. West Conshohocken. PA. 1-6p.
- ASTM C215-14. (2014). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. ASTM International. West Conshohocken. PA. 1-6p.
- Neville, A. (1999). Resistencia del concreto a las temperaturas altas y resistencia al fuego. *Tecnología del concreto*. México DF, México: IMCYC.
- Leming, M. L., Nau, J. M., & Fukuda, J., "Non-Destructive Determination of the Dynamic Modulus of Concrete Disks," *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 1, 1998, pp. 50-57.
- O'Connell, R. J., & Budiansky, B. (1977). *Viscoelastic Properties of Fluid Saturated Cracked Solids*. *Journal of Geophysical Research*, 82(35), 5719-5735.
- Recalde, J. J. (2009). *Estimating Crack Growth in Temperature Damaged Concrete*. Raleigh: North Carolina State University
- Moreno, A. (2018). *Estimación del parámetro de densidad de microfisuras en el hormigón mediante ondas de esfuerzo*. Universidad San Francisco de Quito.

- Orellana, S. (2020). *Evaluación del parámetro de densidad de fisuras de núcleos de hormigón tras exposición a altas temperaturas*. Universidad San Francisco de Quito.
- Paredes, I. (2020). *Estimación del parámetro de densidad de microfisuras en el hormigón mediante ondas de esfuerzo tras exposición a alta temperaturas*. Universidad San Francisco de Quito.
- Zhindón, A. M. (2018). *Cuantificación del deterioro de hormigones convencionales por cargas*. Universidad San Francisco de Quito.
- Ayala, R. (2019). *Cuantificación del deterioro de hormigones convencionales por carga: cambios en propiedades de transporte de fluidos*. Universidad San Francisco de Quito.
- Madariaga, R. (1989). *Propagación de ondas sísmicas en el campo cercano*. Paris, Francia: Instituto de Física de Globo de Paris.
- Wight, J & MacGregor, J. (2015). *Reinforced Concrete. Mechanics and Design*. New Jersey, United States: Pearson.
- Lu, X., Sun, Q., Feng, W., & Tian, J. (2013). *Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method*. *Construction and Building Materials*, 47, 231–239. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.043