

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Evaluación del parámetro de densidad de fisuras de núcleos de  
hormigón tras exposición a altas temperaturas**

**Sabine Brigitte Orellana Guerrero**

**Ingeniería Civil**

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

Quito, 11 de mayo de 2020

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

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

**Evaluación del parámetro de densidad de fisuras de núcleos de hormigón  
tras exposición a altas temperaturas**

**Sabine Brigitte Orellana Guerrero**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Juan José Recalde, Ph.D**

Quito, 11 de mayo de 2020

## **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 el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Sabine Brigitte Orellana Guerrero

Código: 00132562

Cédula de identidad: 2100367016

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2020

## **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## **UNPUBLISHED DOCUMENT**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>.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente a mis padres, Grecia y Luis Benito, quienes son mi pilar de fortaleza y amor. A mi hermano Luis Mario, gracias por toda la paciencia, por creer en mí y apoyarme siempre. A mi tutor Juan José Recalde por darme la oportunidad de continuar con esta investigación y permitirme explorar un campo nuevo, por el apoyo y la confianza. A mis amigos quienes de alguna u otra forma me ayudaron a culminar esta etapa. Un agradecimiento especial a Iara Gordillo, por apoyarme y colaborar físicamente en los ensayos de laboratorio. Gracias a la USFQ y al departamento de Ingeniería Civil por ser una fuente de conocimientos y brindarme los espacios para la realización de este trabajo. Por último, un agradecimiento hacia mí por la perseverancia y el continuo aprendizaje.

## RESUMEN

El hormigón dentro del campo de la construcción cumple un rol importante al ser uno de los materiales más utilizados. Durante su vida útil está expuesto a cargas estáticas y dinámicas y a factores ambientales que afectan su resistencia y durabilidad. Por lo tanto, es necesario su continua investigación. Las investigaciones actuales se basan en el estudio de su daño mediante el análisis de su microestructura. Por lo tanto, este trabajo de integración se enfoca en estimar el parámetro de densidad de fisuras de núcleos de hormigón. 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. Para estimar este parámetro se utilizaron ensayos no destructivos relacionados con ondas de esfuerzo. Se obtuvieron resultados de velocidad de pulso, velocidad de corte y módulo de elasticidad dinámico, mediante los cuales se estimó el parámetro de densidad de fisuras, obteniendo los siguientes resultados: 0.08 para M5, 0.09 para M4 y 0.02 para M3.

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

## ABSTRACT

Within the construction field, the concrete plays an important role, as it is one of the most used materials. During its useful life it is exposed to static and dynamic loads and environmental factors that affects its strength and durability. Therefore, it is necessary to do a continuous research. The current papers are based on the study of its damage by analyzing its microstructure. Thus, this degree work focuses on estimating the crack density parameter of the concrete cores. They are extracted from 3 slabs with different water/cement ratio (M3, M4 y M5). They were exposed to damage, high temperatures. For this, I used non-destructive tests related to stress waves. I got results like pulse velocity, shear velocity and dynamic modulus of elasticity. They were used to estimate the crack density parameter was estimated, obtaining the following results: 0.08 for M5, 0.09 for M4 and 0.02 for M3.

**Keywords:** crack density parameter, pulse velocity, shear velocity, dynamic elastic modulus, non-destructive methods, concrete.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos .....	13
1.4 Actividades.....	14
1.5 Resultados esperados.....	14
1.6 Definiciones .....	14
DESARROLLO .....	16
2.1 Revisión de literatura .....	16
2.1.1 Hormigón expuesto a altas temperaturas .....	16
2.1.2 Evaluación de estructuras de hormigón .....	16
2.1.3 Métodos de evaluación no destructiva .....	17
2.1.4 Ondas de esfuerzo .....	18
2.1.5 Módulos de elasticidad .....	19
2.1.6 Parámetro de densidad de fisuras.....	20
2.1.7 Estudios Preliminares.....	21
2.2 Plan experimental.....	22
2.2.1 Matriz Experimental .....	22
2.3 Metodología .....	22
2.3.1 Extracción de núcleos .....	22
2.3.2 Acondicionamiento mojado y seco .....	24
2.3.3 Velocidad de pulso ( $V_p$ ).....	24
2.3.4 Velocidad de corte ( $V_s$ ) .....	25
2.3.5 Módulo de elasticidad dinámica ( $E_d$ ) .....	28
2.4 Resultados .....	31
2.4.1 Mediciones preliminares de los núcleos de hormigón antes del acondicionamiento .....	31

2.4.2	Resultados en estado mojado .....	31
2.4.3	Resultados en estado seco.....	34
2.4.4	Resultados del parámetro de densidad de fisuras .....	36
2.5	Análisis de resultados.....	37
2.5.1	Análisis de resultados de Velocidad de pulso (Vp) .....	37
2.5.2	Análisis de resultados de Velocidad de corte (Vs) .....	37
2.5.3	Análisis de resultados en estado mojado de Velocidad de Pulso (Vp) y Velocidad de corte (Vs). .....	38
2.5.4	Análisis de resultados en estado seco de Velocidad de pulso (Vp) y Velocidad de corte (Vs).....	39
2.5.5	Análisis de resultados del módulo de Elasticidad dinámico (Ed).....	40
2.5.6	Análisis de resultados del parámetro de densidad de fisuras para cada mezcla (M5, M4 y M3). .....	43
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		46
3.1	Conclusiones.....	46
3.2	Recomendaciones .....	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		48
ANEXO A: ONDA DE CORTE MEDIDA ÚNICAMENTE CON MÉTODO DE TRANSDUCTORES .....		50
ANEXO B: ONDA DE CORTE MEDIDA CON MÉTODO DE TRANSDUCTORES MÁS IMPACTO.....		50
ANEXO C: VELOCIDAD DE PULSO ESTADO MOJADO Y ESTADO SECO .....		51
ANEXO D: VELOCIDAD DE CORTE ESTADO MOJADO Y ESTADO SECO .....		52
ANEXO E: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO MEDIANTE <i>ASTM C215-14</i> ESTADO SECO Y MOJADO .....		53
ANEXO F: CAPTURA DE PANTALLA DE MODELO MATEMÁTICO DE EXCEL PARA CÁLCULO DEL PARÁMETRO DE DENSIDAD DE FISURAS MEZCLA 5.....		54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Detalle de cada mezcla obtenido a partir de (Moreno, 2018) .....	21
Tabla 2. Matriz experimental de ensayos realizados .....	22
Tabla 3. Dimensiones de martillo de acero.....	27
Tabla 4. Dimensiones de los núcleos de hormigón antes del acondicionamiento .....	31
Tabla 5. Velocidad de pulso y velocidad de corte en estado mojado .....	32
Tabla 6. Módulo de elasticidad dinámica mediante ASTM C215-14 en estado mojado .....	33
Tabla 7. Cálculo de módulo de elasticidad dinámica mediante $V_p$ y $V_s$ en estado mojado....	33
Tabla 8. Comparación de resultados de módulo de elasticidad dinámica en estado mojado ..	34
Tabla 9. Medición de velocidad de pulso y velocidad de corte en estado seco .....	34
Tabla 10. Módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) mediante ASTM C215-14 en estado seco ...	35
Tabla 11. Cálculo de módulo de elasticidad dinámica mediante $V_p$ y $V_s$ en estado seco .....	35
Tabla 12. Comparación de resultados de módulo de elasticidad dinámica en estado seco .....	35
Tabla 13. Resultados de parámetro de densidad de fisuras .....	36
Tabla 14. Resumen de resultados del parámetro de densidad de fisuras para cada mezcla ....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cargas mínimas totales de ensayo (ACI 318, 2014). .....	17
Figura 2. Módulo de elasticidad estático del hormigón (Wight & MacGregor, 2015). .....	19
Figura 3. <i>Fórmulas del modelo de O'Connell &amp; Budiansky (1974) (Rosero, 2018)</i> . .....	20
Figura 4. Relaciones entre parámetro de densidad de fisuras y otros parámetros (O'Connell & Budiansky, 1974). .....	20
Figura 5. Mecanismo de exposición a alta temperatura de losetas (Moreno, 2018). .....	21
Figura 6. Mecanismo de extracción de núcleos de hormigón. ....	23
Figura 7. Núcleos de hormigón obtenidos de la perforación .....	23
Figura 8. Esquema del aparato de velocidad de pulso. ....	25
Figura 9. Esquema de conexión para medir velocidad de pulso. ....	25
Figura 10. Esquema de conexión para medir velocidad de corte. ....	26
Figura 11. Ondas de pulso mostradas en el osciloscopio. ....	26
Figura 12. Mecanismo experimental de medición de Velocidad de Corte (Vs). ....	27
Figura 13. Martillo de acero con esfera soldada para dar golpes. ....	27
Figura 14. Medición de diferencia de tiempo entre puntos iniciales de cada onda de pulso. ...	28
Figura 15. Método de ensayo experimental por impacto (ASTM C215, 2014). ....	30
Figura 16. Método de ensayo experimental. ....	30
Figura 17. Ondas de pulso registradas. ....	30
Figura 18. Histograma de resultados de Velocidad de pulso (Vp) en estado mojado y seco ..	37
Figura 19. Histograma de resultados de Velocidad de corte (Vs) en estado mojado y seco ...	38
Figura 20. Velocidad de pulso (Vp) y Velocidad de corte (Vs) en estado mojado (skd) .....	39
Figura 21. Velocidad de pulso (Vp) y Velocidad de corte (Vs) en estado seco (dry) .....	40
Figura 22. Módulo de elasticidad dinámica (Ed) mediante ASTM C215-14 seco y mojado ..	41
Figura 23. Comparación de resultados del Módulo de elasticidad dinámica (Ed) obtenido mediante Vp – Vs y por ASTM C215-14 en estado mojado .....	41
Figura 24. Comparación de resultados del Módulo de elasticidad dinámica (Ed) obtenido mediante relación Vp, Vs y ASTM C215-14 en estado seco .....	42
Figura 25. Relación entre el parámetro de densidad de fisuras y el módulo de elasticidad dinámico para los núcleos de la mezcla 5 .....	44
Figura 26. Relación entre el parámetro de densidad de fisuras y el módulo de elasticidad dinámico para los núcleos de la mezcla 4 .....	44
Figura 27. Relación entre el parámetro de densidad de fisuras y módulo de elasticidad dinámico para los núcleos de la mezcla 3 .....	45

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Actualmente el hormigón en comparación con otros materiales constructivos como el acero, madera, ladrillo, derivados sintéticos, entre otros, es uno de los más utilizados debido a su alta resistencia a esfuerzos de compresión, bajos costos, gran disponibilidad de sus componentes (cemento, agregados, agua), larga vida útil, entre otros.

A partir de su auge que inicia en el siglo XIX con la patente del cemento Portland por Joseph Aspdin (TEIDE, 2013) se comienzan a estudiar y crear nuevas tecnologías del hormigón con el objetivo de obtener materiales más resistentes y duraderos. A lo largo de su vida el hormigón se somete a factores ambientales (cambios de temperatura, exposición a luz solar, al agua) y a cargas estáticas y dinámicas. Además de ello, existen otros factores extremos como sobrecargas y altas temperaturas (incendios). Estos eventos afectan sus propiedades mecánicas y por consiguiente su resistencia y durabilidad. Por lo tanto, uno de los enfoques al momento de estudiar este material es determinar ensayos y metodologías que cuantifiquen el daño.

Actualmente las investigaciones se enfocan en la microestructura del hormigón ya que se plantea que existe una relación entre los cambios de esta con las propiedades mecánicas. Por lo tanto, un buen indicador de estos daños es el parámetro de densidad de fisuras (Recalde, 2009).

Este proyecto consiste en la continuación del trabajo de titulación de Andrea Moreno (2018) quien evaluó el parámetro de densidad de fisuras en losas de hormigón de diferentes mezclas que fueron sometidas a daño, a altas temperaturas (450 °C *por dos horas*). Para esto se usaron ensayos no destructivos (ondas de esfuerzo) antes y después del daño, tanto en estado mojado como seco.

A su vez, dicho proyecto se realizó en base a la investigación doctoral de Recalde (2009), quien estudió cómo los cambios en la microestructura están relacionados con los cambios en las propiedades mecánicas y la penetrabilidad de los fluidos. Para lo cual, Recalde desarrolló una metodología basada en la teoría de O'Connell & Budiansky (1974) con la finalidad de estimar el parámetro de densidad de fisuras en el hormigón.

Por lo tanto, los análisis a continuación se enfocan en determinar dicho parámetro en núcleos de hormigón extraídos de las losas dañadas (450 °C *por dos horas*), utilizando de igual forma, ensayos no destructivos (ondas de esfuerzo) en estado mojado y seco.

## **1.2 Justificación**

Debido al gran uso del hormigón en diferentes obras civiles y a los factores a los que está sometido es importante su continua investigación. Uno de los campos es el análisis de elementos estructurales que han sufrido daño. Como se planteó anteriormente, la microestructura está relacionada con las propiedades mecánicas del hormigón y con la resistencia a compresión. Estudiarla permitirá mejorar la capacidad de diseño y construcción obteniendo de esta forma elementos estructurales con mayor vida útil (Recalde, 2009).

Por lo tanto, en este proyecto se analiza la microestructura de especímenes de concreto dañados mediante la estimación del parámetro de densidad de fisuras. Además, en la actualidad no existe ninguna normativa que establezca un procedimiento para la evaluación de este parámetro, por lo que es necesario su desarrollo y es lo que se va a llevar a cabo a lo largo de este trabajo.

## **1.3 Objetivos**

- Determinar el parámetro de densidad de fisuras de núcleos de hormigón tras la exposición a altas temperaturas.

- Realizar ensayos no destructivos basados en ondas de esfuerzo: velocidad de pulso ( $V_p$ ), velocidad de corte ( $V_s$ ).
- Determinar el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) a cada núcleo de hormigón mediante ensayos bajo la norma ASTM y a través de la relación entre  $V_p$  y  $V_s$ .

#### **1.4 Actividades**

- Extraer núcleos a losetas de hormigón que ya han sido expuestas a altas temperaturas.
- Medir velocidad de pulso ( $V_p$ ), velocidad de corte ( $V_s$ ) y módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) a los núcleos de hormigón en estado mojado y seco.
- Calcular módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por dos métodos: ensayo de la norma ASTM C215-14, y mediante relación Velocidad de pulso ( $V_p$ ) y Velocidad de corte ( $V_s$ ).
- Calcular el parámetro de densidad de fisuras de cada núcleo de hormigón a partir de los cálculos obtenidos.
- Analizar los resultados.

#### **1.5 Resultados esperados**

- Resultados de velocidad de pulso ( $V_p$ ), velocidad de corte ( $V_s$ ) y módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) en estado mojado y seco de cada núcleo de hormigón.
- Resultados del parámetro de densidad de fisuras de cada núcleo de hormigón.

#### **1.6 Definiciones**

Debido a que para cumplir con los objetivos del proyecto se realizan diferentes ensayos y mediciones, es necesario conocer los siguientes conceptos, los cuales, se mencionan a lo largo del estudio.

- Velocidad de pulso ( $V_p$ ): Es un parámetro que mide la velocidad de ondas de tensión longitudinales a través de un medio que en este caso es una masa de hormigón. Se caracteriza porque su valor depende de las propiedades elásticas y densidad del medio.
- Velocidad de corte ( $V_s$ ): A diferencia del  $V_p$ , mide la velocidad de ondas transversales a través de un medio, en este caso hormigón.

## DESARROLLO

### 2.1 Revisión de literatura

#### 2.1.1 Hormigón expuesto a altas temperaturas

El hormigón al igual que otros materiales al someterse a altas temperaturas va a sufrir cambios en sus propiedades físicas y químicas, las cuales afectan directamente las propiedades mecánicas. Dependiendo de la temperatura, el tiempo de exposición, la composición del hormigón, este puede verse más o menos afectado.

Las altas temperaturas generan un incremento de las microfisuras debido a que ocurren cambios volumétricos por los diferentes coeficientes de dilatación de sus elementos, además ocurre un aumento de presión de poro y descomposición de los productos de hidratación. Todos estos fenómenos provocan una acción de contracción-expansión de la pasta de cemento (Ercolani, Ortega y Señas, 2007).

De acuerdo a Huo, Jin, Tu, He y Liu (2016) exposiciones a temperaturas mayores a 400 °C aumentan la deshidratación y porosidad, lo cual provoca una mayor descomposición de la estructura del hormigón. Este cambio de estructura se debe a un aumento en las microfisuras, lo cual también afecta a la resistencia a compresión.

#### 2.1.2 Evaluación de estructuras de hormigón

En términos generales la evaluación de estructuras de hormigón se puede clasificar en procedimientos destructivos, semidestructivos y no-destructivos.

El capítulo 27 del ACI 318-14 establece métodos analíticos y pruebas de carga para evaluar la resistencia de las estructuras de hormigón. Para los métodos analíticos puede usarse métodos no destructivos o determinarse un  $f'_c$  equivalente ya sea de cilindros de la construcción original o de núcleos, los cuales se basan en técnicas descritas en el ACI 214.4R.

Además, se deben aplicar factores de reducción de resistencia que se muestran en las respectivas tablas.

Por otro lado, las pruebas de carga consisten en someter a una carga total gravitatoria la zona del miembro considerada como crítica. Dicha carga no debe ser menor que el mayor de a), b) y c). De igual forma, “debe aplicarse en no menos de cuatro incrementos aproximadamente iguales” (ACI 318, 2014).

$$(a) T_t = 1.15D + 1.5L + 0.4(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) \quad (27.4.2.2a)$$

$$(b) T_t = 1.15D + 0.9L + 1.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) \quad (27.4.2.2b)$$

$$(c) T_t = 1.3D \quad (27.4.2.2c)$$

Figura 1. Cargas mínimas totales de ensayo (ACI 318, 2014).

Previo a la carga del elemento se deben tomar mediciones iniciales de” deflexión, rotación, deformación unitaria, deslizamiento, ancho de fisura, en las ubicaciones en donde se espera la respuesta máxima” (ACI 318, 2014). De igual forma, después de cada incremento de carga y después de que la carga total haya permanecido por 24 horas, deben realizarse mediciones pertinentes. Existen varios criterios de aceptación, algunos de ellos son: los miembros ensayados no deben presentar fisuras que indiquen falla a cortante, descascaramiento, aplastamiento o deflexión de tal magnitud que sea evidente.

### 2.1.3 Métodos de evaluación no destructiva

Como su nombre lo indica son ensayos no invasivos que son evaluados en construcciones de hormigón como cimentaciones, puentes, edificios, pavimentos, entre otros, con el objetivo de determinar propiedades (ACI 228.2R,2013). Algunos de los métodos son:

- Velocidad de pulso: mide el tiempo de viaje sobre una longitud de trayectoria conocida de un pulso de onda ultrasónica de compresión (ACI 228.2R,2013).

- Impacto Eco: consiste en generar una onda de estrés a partir de un impacto en algún punto en la superficie del espécimen. Esta onda es captada por un receptor adyacente. Mediante un análisis de frecuencia se determina la distancia al reflector si se conoce la velocidad de onda o viceversa (ACI 228.2R,2013).
- Esclerómetro: Es un instrumento utilizado para la determinación de la resistencia a compresión del hormigón, en la que se obtiene como parámetro el índice de rebote, el cual es una unidad adimensional que relaciona la dureza superficial del hormigón con su resistencia (Sanjuán, n/a).

#### **2.1.4 Ondas de esfuerzo**

##### ***2.1.4.1 Velocidad de pulso***

Es la velocidad con la que una onda P viaja a través de un medio elástico. Esta onda conocida como primaria es una onda longitudinal en la que ocurren esfuerzos de compresión y tensión. Estas ondas se caracterizan por viajar a través de cualquier tipo de material y alcanzan una velocidad 1.73 veces mayor que la onda S (Madariaga, 1989).

El método para obtener la velocidad de pulso en el concreto establecido por la ASTM C597-16 corresponde a un test no destructivo. Este ensayo consiste en medir el tiempo que se demora en recorrer la onda desde un transductor a otro, para esto se debe conocer el parámetro de longitud del espécimen. Las ondas P se forman debido a que el transductor envía impulsos de vibración longitudinales (Silva, 2017).

##### ***2.1.4.2 Velocidad de corte***

Corresponde a la velocidad de las ondas S conocidas también como secundarias. A diferencia de la anteriores, estas ondas son de corte, es decir, que actúan en el sentido transversal a la propagación de la onda. Las ondas S solo pueden viajar a través de medios

sólidos debido a que los líquidos no soportan esfuerzos de corte (Madariaga, 1989). No existe una norma ASTM para realizar este tipo de ensayos. Normalmente se lo utiliza para detectar cambios en el módulo de elasticidad dinámico.

## 2.1.5 Módulos de elasticidad

### 2.1.5.1 Módulo de Elasticidad Estático

Es la relación entre el esfuerzo al que está sometido el concreto y su deformación unitaria, es decir, es la pendiente de la recta entre dos puntos. Cuando dicha relación es lineal, constante y los esfuerzos no alcanzan el límite de proporcionalidad, entonces, el material tiene un comportamiento elástico que cumple con la Ley de Hooke (Wight & MacGregor, 2015).

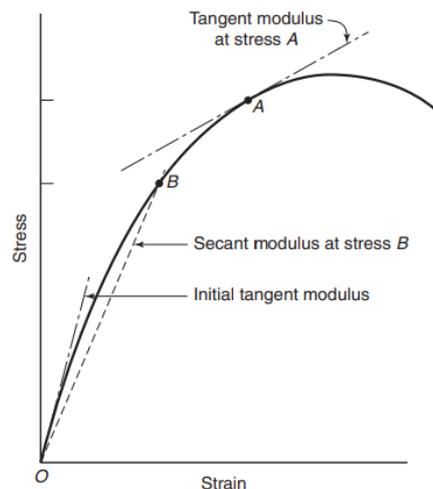


Figura 2. Módulo de elasticidad estático del hormigón (Wight & MacGregor, 2015).

### 2.1.5.2 Módulo de Elasticidad Dinámico

También conocido como módulo de Young es la pendiente de la relación entre esfuerzo y deformación bajo condiciones dinámicas como vibración. A diferencia del módulo de elasticidad estático, el dinámico ( $E_d$ ) no puede determinarse mediante ensayos de compresión de cilindros de hormigón. Por lo tanto, para su estimación se utilizan métodos no destructivos como frecuencias resonantes y velocidad de pulso (Lu et al, 2013).

### 2.1.6 Parámetro de densidad de fisuras

Este parámetro utilizado en la investigación doctoral de Recalde, (2009) es estudiado 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 esto, 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 3. Fórmulas del modelo de O'Connell & Budiansky (1974) (Rosero, 2018).

Este modelo también describe la relación entre el parámetro de densidad de fisuras y los cambios en la relación del módulo de Poisson, módulo de compresibilidad, módulo de corte y módulo de Young como se observa en los diferentes cuadrantes de la Figura 4. Además, analiza cómo estos resultados cambian de acuerdo al estado al que son sometidos: saturado, mojado y seco. Para este proyecto se va a utilizar únicamente el cuadrante encerrado de color rojo ya que presenta la relación con el módulo de Young también conocido como módulo de Elasticidad dinámico (Ed).

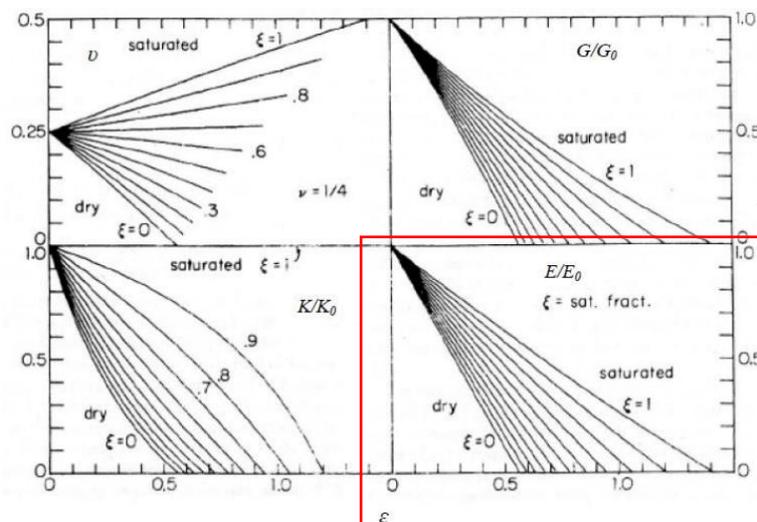


Figura 4. Relaciones entre parámetro de densidad de fisuras y otros parámetros (O'Connell & Budiansky, 1974).

### 2.1.7 Estudios Preliminares

Este proyecto consiste en la continuación del trabajo de titulación “Estimación del parámetro de densidad de fisuras en el hormigón mediante ondas de esfuerzo” de Andrea Moreno (2018). En este trabajo se realizaron 3 mezclas con diferente relación agua/cemento denominadas M3, M4 y M5. Para cada mezcla se fabricaron 3 losetas de hormigón con dimensiones de 40x40x20 cm, obteniendo un total de 9 losetas de hormigón. En la tabla 1 se observa los datos de relación agua/cemento y resistencia a la compresión de cada mezcla obtenidos en la investigación de Moreno (2018).

Tabla 1. *Detalle de cada mezcla obtenido a partir de (Moreno, 2018)*

Nombre de mezcla	Relación agua/cemento	Resistencia a la compresión [MPa]
M3	0.35	55
M4	0.45	35
M5	0.60	30

En dicha investigación se realizaron ensayos no destructivos de velocidad de pulso (Vp), velocidad de corte (Vs) y número de rebote (NR) en estado seco y mojado, antes y después del daño, el cual consistió en someter a las losas de hormigón a  $450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  *por dos horas*. Para esto se utilizó un horno no industrial con conexión a gas colocado en la parte inferior de la loseta, la misma que estaba cubierta por lana de vidrio y bloques de cerámica. La loseta estaba sostenida por una plancha de acero.



Figura 5. Mecanismo de exposición a alta temperatura de losetas (Moreno, 2018).

## 2.2 Plan experimental

### 2.2.1 Matriz Experimental

Debido a que este trabajo corresponde a la continuación del proyecto de titulación de Moreno (2018) una vez que se sometieron las losetas a daño (altas temperaturas) se prosiguió a extraer núcleos. Para cada núcleo se realizaron ensayos no destructivos de velocidad de pulso, velocidad de corte y módulo de elasticidad dinámico, tanto en estado mojado como en estado seco. A continuación, se presenta la matriz de los experimentos a realizar:

Tabla 2. *Matriz experimental de ensayos realizados*

Número mezcla	Nombre	#Núcleos	Mojado (SKD)			Seco (DRY)		
			Vp	Vs	Ed	Vp	Vs	Ed
Mezcla 5	M5A	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	M5B	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	M5C	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Mezcla 4	M4A	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	M4B	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	M4C	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Mezcla 3	M3A	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	M3B	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	M3C	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si

## 2.3 Metodología

### 2.3.1 Extracción de núcleos

Para la extracción de núcleos se utilizó la norma ASTM C42/C42M-16. Se extrajo 1 núcleo por cada loseta de hormigón expuesta a altas temperaturas (estado de daño), obteniendo de esta forma 9 núcleos de hormigón. Para esto se utilizó un equipo de perforación compuesto principalmente por una broca con punta de diamante con la que se obtiene especímenes de hormigón cilíndricos (núcleos). El taladro está sostenido a la loseta mediante un perno auto perforante.

La perforación debe realizarse en sentido perpendicular a la superficie (ASTM C42, 2016). Durante la perforación la máquina constantemente debe liberar agua. De acuerdo a la

ASTM C42 (2016) para el estudio de losas de hormigón los núcleos deben tener un diámetro mínimo de 94 mm y su longitud debe estar entre 1.9 y 2.1 veces el diámetro. Una vez obtenidos todos los especímenes debe mantenerse condiciones de humedad, para lo cual se recomienda colocarlos en bolsas plásticas o contenedores no absorbentes.



Figura 6. Mecanismo de extracción de núcleos de hormigón.



Figura 7. Núcleos de hormigón obtenidos de la perforación

### **2.3.2 Acondicionamiento mojado y seco**

El acondicionamiento mojado fue el primero que se aplicó. Una vez que se obtuvieron los 9 núcleos de hormigón se los ingresó al mismo tiempo en un tanque de curado saturado en hidróxido de calcio a 23°C. Por otra parte, el acondicionamiento seco consistió en dejar los especímenes secarse al aire libre, es decir, a temperatura ambiente de laboratorio.

### **2.3.3 Velocidad de pulso ( $V_p$ )**

Se utilizó la norma ASTM C597-16. Estos ensayos se realizaron a los 9 núcleos tanto para la condición mojada como seca. Consiste en generar pulsos de ondas de esfuerzo longitudinal (ondas P) a través de una superficie de concreto. Para esto se dispuso el núcleo en sentido longitudinal, en los dos extremos de la superficie se colocó un transductor, los cuales estaban conectados a través de cables a un generador de pulso como se observa en la figura 8 y 9. Este generador debe producir pulsos repetitivos al menos 3 veces por segundo (ASTM C597, 2016). El aparato utilizado arrojó directamente los valores de velocidad de pulso ya que se ingresa el dato de longitud entre transductores. Sin embargo, dichos resultados se pueden obtener también al dividir el tiempo que se demora la onda desde un transductor a otro (dato proporcionado por el aparato), para la longitud del núcleo. La velocidad de pulso se reporta a los 10 m/s más cercanos.

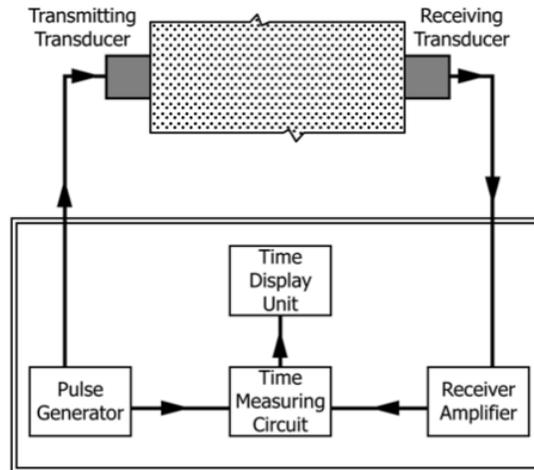


Figura 8. Esquema del aparato de velocidad de pulso.



Figura 9. Esquema de conexión para medir velocidad de pulso.

### 2.3.4 Velocidad de corte ( $V_s$ )

No existe norma ASTM que explique cómo realizar este ensayo. Por lo tanto, se diseñó un procedimiento para calcular la velocidad de corte. 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 marca Digilent (ver figura 10), el cual graficaba las ondas de pulso en la computadora. Debido a que las ondas de pulso no eran percibidas por el osciloscopio (ver figura 11) se planteó otro mecanismo.



Figura 10. Esquema de conexión para medir velocidad de corte.

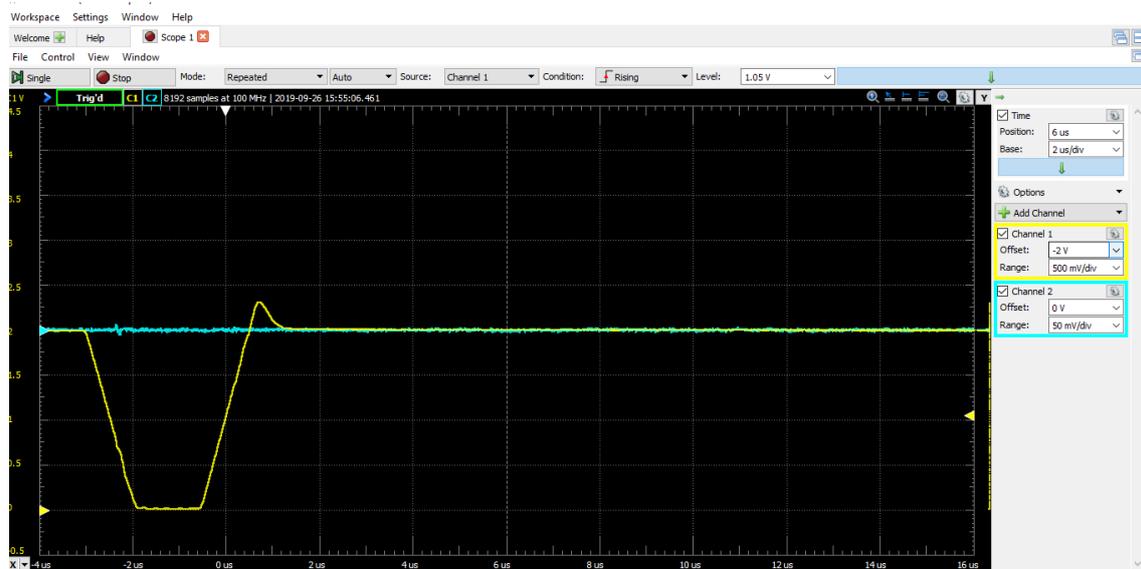


Figura 11. Ondas de pulso mostradas en el osciloscopio.

Este otro mecanismo se basó en un método de impacto. Se utilizaron los mismos transductores, pero en vez del generador de pulsos se usó un martillo de acero soldado a una esfera (ver figura 12), 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.

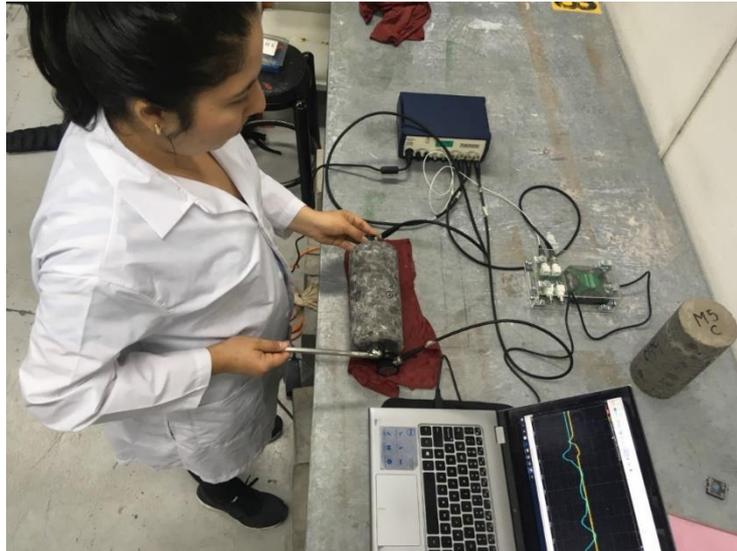


Figura 12. Mecanismo experimental de medición de Velocidad de Corte ( $V_s$ ).

Tabla 3. Dimensiones de martillo de acero

Medición	Unidad	Resultado
Masa de martillo	g	213.50
Diámetro de esfera	cm	2.56
Longitud total	cm	24.73
Ancho de varilla	cm	1.00



Figura 13. Martillo de acero con esfera soldada para dar golpes.

Se utilizó la herramienta de líneas verticales proporcionada por el osciloscopio para medir la diferencia de tiempo  $\Delta_t$  en  $\mu s$  entre el inicio de la onda de pulso de entrada y el inicio

de la onda de pulso de salida (ver figura 14). Se reportó la velocidad de corte la cual se obtiene al dividir el  $\Delta_t$  para la longitud entre las caras de los transductores.

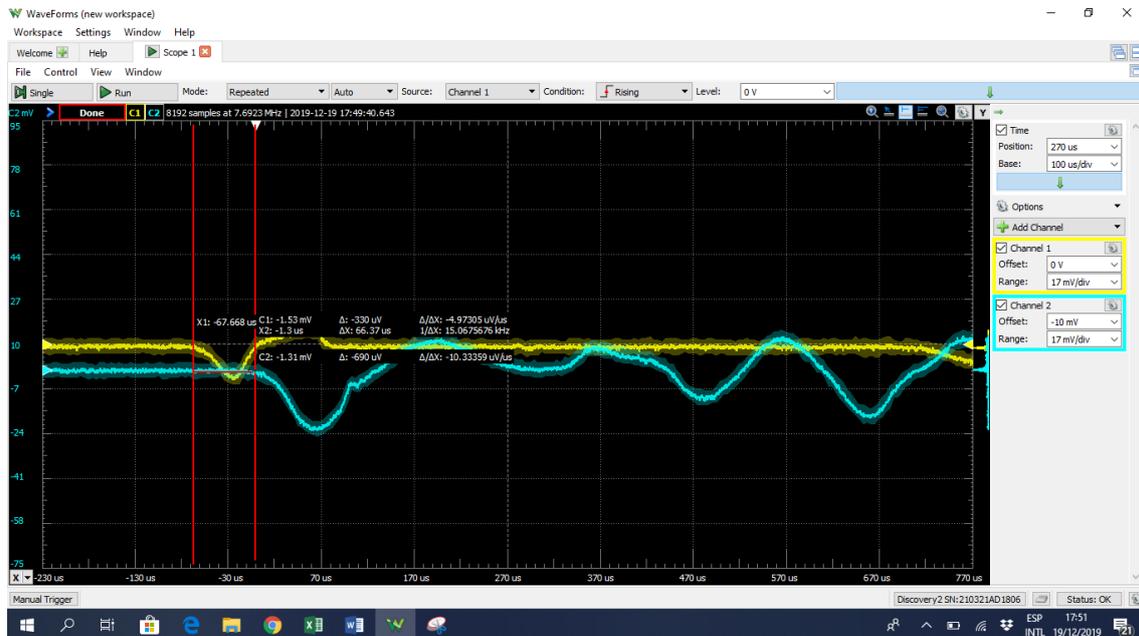


Figura 14. Medición de diferencia de tiempo entre puntos iniciales de cada onda de pulso.

### 2.3.5 Módulo de elasticidad dinámica ( $E_d$ )

Este valor se obtuvo por dos métodos: el primero, mediante ensayos especificados en la norma ASTM C215-14, y el segundo mediante la siguiente ecuación que relaciona Velocidad de pulso ( $V_p$ ) y Velocidad de corte ( $V_s$ ) (Barton en Živor et al., 2011):

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$$

En donde:

$E_d$  = módulo de elasticidad dinámico [Pa]

$\rho$  = densidad de cada núcleo [ $kg/m^3$ ]

$V_s$  = velocidad de corte [m/s]

$V_p$  = velocidad de pulso [m/s]

Dichos valores de velocidad para las ondas de esfuerzo (pulso y corte) se obtuvieron de acuerdo a los procedimientos explicados en las secciones de arriba.

Para el primer método basado en la norma ASTM C215-14 se utilizó una técnica por impacto para medir frecuencia transversal, para esto se colocó el cilindro sobre dos apoyos (varillas de acero) a una distancia de  $0.224L$  medida desde los extremos, en un punto superior del cilindro se colocó un acelerómetro piezoeléctrico (Ver figura 15). Con ayuda de una bola de acero con masa de 66.93 g se dieron golpes al núcleo (Ver figura 16). Con ayuda del osciloscopio análogo marca Digilent se registraron las ondas de pulso (Ver figura 17). De acuerdo a la norma el ensayo debe realizarse 3 veces por cilindro, si la medición de frecuencia se desvía del promedio más de un 10% se debe eliminar y repetir (ASTM C215, 2014). En el osciloscopio se midió el tiempo durante 10 ciclos de onda, es decir se determinó su periodo. Al dividir 1 para este tiempo se obtiene la frecuencia en Hz. Además de estos valores, se reportaron datos de masa y dimensiones de los núcleos, los cuales son necesarios para el posterior cálculo del módulo de Elasticidad dinámico. Para obtener el valor de  $E_d$  se utiliza la siguiente fórmula:

$$E_d = CMn^2$$

En donde:

$M$  = masa [kg],

$n$  = frecuencia transversal fundamental [Hz]

$$C = 1.6067 \left( \frac{L^3 T}{d^4} \right) [m^{-1}]$$

$L$  = longitud del espécimen [m]

$d$  = diámetro del cilindro

$T$  = factor de corrección depende de  $K/L$  y módulo de Poisson.

En base a investigaciones anteriores se usó un  $\mu = 0.23$

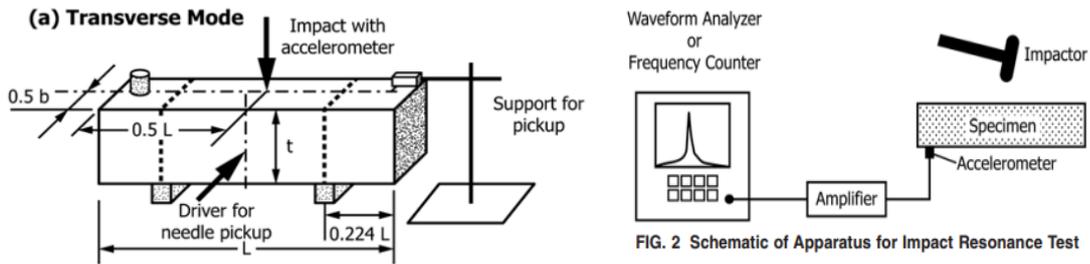


Figura 15. Método de ensayo experimental por impacto (ASTM C215, 2014).

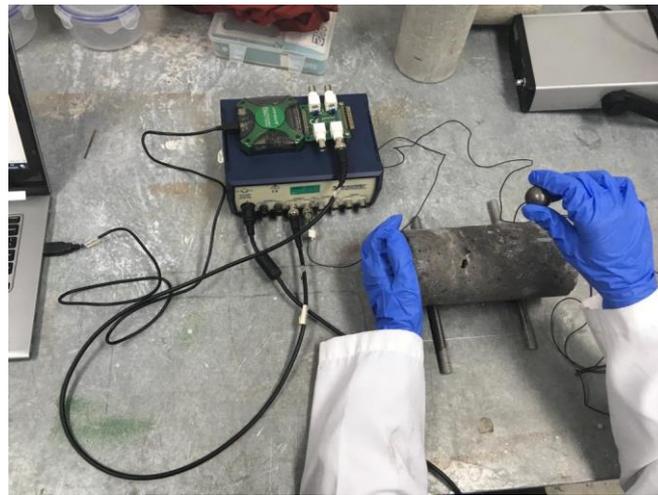


Figura 16. Método de ensayo experimental.

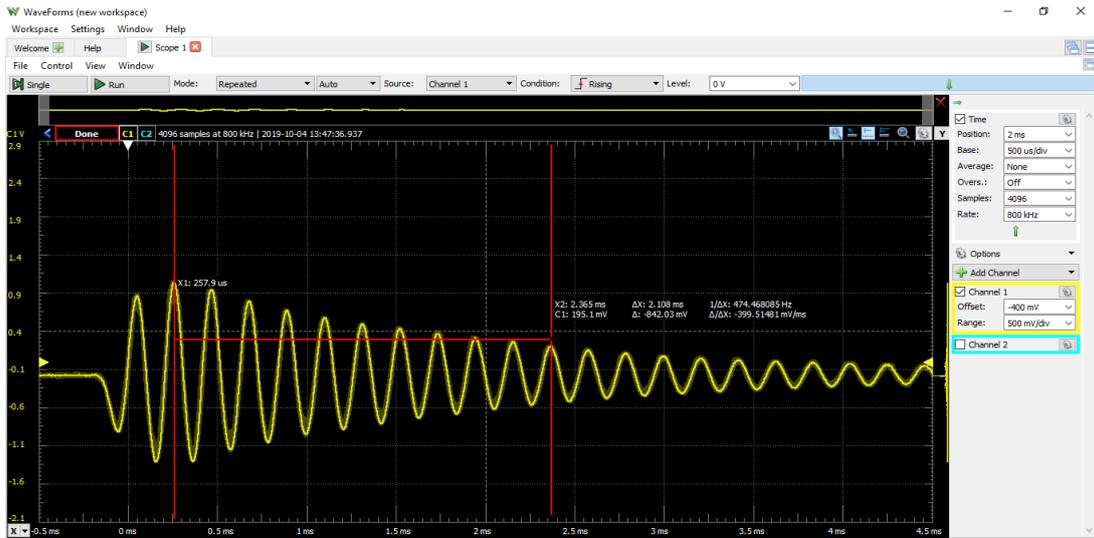


Figura 17. Ondas de pulso registradas.

## 2.4 Resultados

### 2.4.1 Mediciones preliminares de los núcleos de hormigón antes del acondicionamiento

Antes de realizar los ensayos experimentales de  $V_p$ ,  $V_s$  y  $E_d$  en estado seco y mojado de los 9 núcleos de hormigón, se tomaron mediciones de longitud y diámetro como se observa en la tabla 4. Estos datos no varían de acuerdo al estado del hormigón (seco y mojado). Además, son necesarios para posteriores cálculos.

Ya que se fabricaron 3 mezclas de hormigón con relación agua cemento diferentes (Tabla 1), se debe tener presente las siguientes notaciones que se exponen en todas las tablas. M5 corresponde a la mezcla con  $w/c = 0.60$ ; M4 a la mezcla con  $w/c = 0.45$  y M3 con  $w/c = 0.35$ . Para cada mezcla se obtuvieron 3 núcleos de hormigón, a cada uno se les asignó la notación de A, B y C. De esta forma, M5A es nombre del núcleo A de la mezcla 5.

Tabla 4. Dimensiones de los núcleos de hormigón antes del acondicionamiento

Nombre núcleo	Longitud [mm]	Diámetro [mm]
M5A	201.0	95.0
M5B	201.0	95.2
M5C	201.0	94.3
M4A	201.0	95.0
M4 B	201.0	95.0
M4C	205.0	94.6
M3A	204.0	94.8
M3B	202.0	94.9
M3C	201.0	94.3

### 2.4.2 Resultados en estado mojado

Para cada estado (seco y mojado) al que se sometieron los núcleos de hormigón, se realizaron 3 ensayos experimentales: velocidad de pulso ( $V_p$ ), velocidad de corte ( $V_s$ ) (observar tabla 5) y módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) (observar tabla 6). Aparte de obtener

este último parámetro ( $E_d$ ) mediante ensayos, se lo calculó utilizando resultados de velocidad de pulso y velocidad de corte (observar tabla 7). El objetivo es comparar ambos resultados de  $E_d$  (observar tabla 8) y analizar si es viable la determinación de este factor mediante ondas de esfuerzo.

La tabla 5 presentada a continuación expone los resultados de los ensayos de Velocidad de pulso ( $V_p$ ) obtenidos por norma ASTM C597-16 y Velocidad de corte ( $V_s$ ) obtenidos por metodología diseñada.

Tabla 5. *Velocidad de pulso y velocidad de corte en estado mojado*

<b>Nombre núcleo</b>	<b>Velocidad de pulso [m/s]</b>	<b>Velocidad de corte [m/s]</b>
M5A	3718	2639
M5B	3764	2368
M5C	3870	3279
M4A	3926	2613
M4 B	4085	3298
M4C	4009	2401
M3A	4280	3050
M3B	4344	3288
M3C	4313	2851

La tabla 6 presenta los resultados del módulo de elasticidad dinámica o también conocido como módulo de Young, obtenidos mediante la norma ASTM C215-14. Estos resultados se observan en la columna final de la derecha. De acuerdo a la norma, para calcular  $E_d$  se mide en laboratorio: masa de los núcleos, frecuencia transversal fundamental, longitud y diámetro del espécimen. La fórmula que establece la norma para su cálculo es la siguiente:

$$E_d = CMn^2$$

Tabla 6. *Módulo de elasticidad dinámica mediante ASTM C215-14 en estado mojado*

Nombre núcleo	Masa [kg]	Frecuencia transversal n [Hz]	Radio de giro K [m]	Factor corrección T con u=0.23	Ed [Gpa]
M5A	3.05	4436	0.0238	2.05	19.7
M5B	3.07	4350	0.0238	2.05	18.9
M5C	3.05	4481	0.0236	2.05	20.7
M4A	3.07	4751	0.0238	2.05	22.7
M4 B	3.09	5123	0.0238	2.05	26.7
M4C	3.05	4815	0.0237	2.05	25.1
M3A	3.19	5185	0.0237	2.05	29.7
M3B	3.19	5298	0.0237	2.05	30.0
M3C	3.15	5378	0.0236	2.05	30.8

La tabla 7 presenta los cálculos y resultados del módulo de elasticidad dinámico Ed utilizando datos de velocidad de pulso (Vp) y velocidad de corte (Vs) expuestos en la tabla 5. Estos resultados se observan en la columna final de la derecha. Para obtener estos valores se utiliza la siguiente fórmula (Barton en Živor et al., 2011) mencionada anteriormente:

$$Ed = \frac{\rho Vs^2(3Vp^2 - 4Vs^2)}{(Vp^2 - Vs^2)}$$

En donde:

$Ed$  = módulo de elasticidad dinámico [Pa]

$\rho$  = densidad de cada núcleo [kg/m<sup>3</sup>]

$Vs$  = velocidad de corte [m/s]

$Vp$  = velocidad de pulso [m/s]

Tabla 7. *Cálculo de módulo de elasticidad dinámica mediante Vp y Vs en estado mojado*

Nombre núcleo	Masa [kg]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Ed [Gpa]
M5A	3.05	0.00142	2138.65	3718	2639	29.6
M5B	3.07	0.00143	2147.15	3764	2368	28.2
M5C	3.05	0.00140	2171.94	3870	3279	10.7
M4A	3.07	0.00142	2151.28	3926	2613	32.4
M4 B	3.09	0.00142	2171.64	4085	3298	26.6
M4C	3.05	0.00144	2116.77	4009	2401	29.8
M3A	3.19	0.00144	2212.63	4280	3050	40.5
M3B	3.19	0.00143	2233.33	4344	3288	40.0
M3C	3.15	0.00140	2241.04	4313	2851	40.5

La tabla 8 es un resumen comparativo de los resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenidos mediante los dos procedimientos: usando valores de  $V_p$  y  $V_s$  (columna izquierda) y mediante norma ASTM C215-14 (columna derecha).

Tabla 8. *Comparación de resultados de módulo de elasticidad dinámica en estado mojado*

Nombre núcleo	Ed por $V_p$ y $V_s$ [GPa]	Ed con ASTM C215-14 [GPa]
M5A	29.6	19.7
M5B	28.2	18.9
M5C	10.7	20.7
M4A	32.4	22.7
M4 B	26.6	26.7
M4C	29.8	25.1
M3A	40.5	29.7
M3B	40.0	30.0
M3C	40.5	30.8

### 2.4.3 Resultados en estado seco

Ya que para el estado de acondicionamiento seco se realizaron los mismos ensayos a los núcleos de hormigón, los procedimientos de cálculo son iguales, obteniéndose los resultados a continuación:

Tabla 9. *Medición de velocidad de pulso y velocidad de corte en estado seco*

Nombre núcleo	Velocidad de pulso [m/s]	Velocidad de corte [m/s]
M5A	3780	3065
M5B	3752	3041
M5C	3878	3915
M4A	3885	3932
M4 B	4077	4474
M4C	3999	2945
M3A	4253	3710
M3B	4322	5958
M3C	4389	4111

Tabla 10. *Módulo de elasticidad dinámico (Ed) mediante ASTM C215-14 en estado seco*

Nombre núcleo	Masa [kg]	Frecuencia transversal n [Hz]	Radio de giro K [m]	Factor corrección T con u=0.23	Ed [Gpa]
M5A	2.93	4336	0.024	2.05	18.1
M5B	2.95	4171	0.024	2.05	16.7
M5C	2.93	4427	0.024	2.05	19.4
M4A	2.98	4481	0.024	2.05	19.7
M4 B	3.04	4952	0.024	2.05	24.5
M4C	2.95	4678	0.024	2.05	22.9
M3A	3.14	5166	0.024	2.05	29.0
M3B	3.15	5235	0.024	2.05	28.9
M3C	3.11	5289	0.024	2.05	29.5

Tabla 11. *Cálculo de módulo de elasticidad dinámica mediante Vp y Vs en estado seco*

Nombre núcleo	Masa [kg]	Volumen [m3]	Densidad [kg/m3]	Vp	Vs	Ed [Gpa]
M5A	2.93	0.00142	2058.63	3780	3065	20.9
M5B	2.95	0.00143	2063.27	3752	3041	20.7
M5C	2.93	0.00140	2087.88	3878	3915	1814.1
M4A	2.98	0.00142	2094.43	3885	3932	1472.0
M4 B	3.04	0.00142	2133.73	4077	4474	380.0
M4C	2.95	0.00144	2049.45	3999	2945	32.3
M3A	3.14	0.00144	2182.77	4253	3710	-5.5
M3B	3.15	0.00143	2207.44	4322	5958	400.4
M3C	3.11	0.00140	2217.53	4389	4111	-155.1

Tabla 12. *Comparación de resultados de módulo de elasticidad dinámica en estado seco*

Nombre núcleo	Ed por Vp y Vs [GPa]	Ed con ASTM C215-14 [GPa]
M5A	20.9	18.1
M5B	20.7	16.7
M5C	1814.1	19.4
M4A	1472.0	19.7
M4 B	380.0	24.5
M4C	32.3	22.9
M3A	-5.5	29.0
M3B	400.4	28.9
M3C	-155.1	29.5

#### 2.4.4 Resultados del parámetro de densidad de fisuras

La tabla 13 presenta los resultados del parámetro de densidad de fisuras ( $\varepsilon$ ) para cada núcleo de hormigón. Estos valores están en la última columna a la derecha. Además, se presentan valores de módulo de elasticidad dinámico en estado mojado ( $E_d$  skd), módulo de elasticidad dinámico en estado seco ( $E_d$  dry), módulo de Poisson mojado ( $\nu$  skd) y módulo de Poisson seco ( $\nu$  dry). Estos valores corresponden a los obtenidos mediante la norma ASTM C215-14 ya que fueron los más precisos, los mismos se usaron para los respectivos cálculos del parámetro de densidad de fisuras ( $\varepsilon$ ). Para este cálculo se utiliza el modelo matemático de O'Connell & Budiansky (1974), para lo cual con ayuda de herramientas de Excel se realiza un modelo de optimización que consiste en igualar la ecuación del parámetro de densidad de fisuras en estado mojado con la ecuación de estado seco, además, establecen ciertas restricciones y se usan las siguientes fórmulas. (En anexos se observa una captura de pantalla del modelo utilizado en Excel).

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{16}{45} (1 - \nu^2) \left[ 3D + \frac{4}{(2 - \nu)} \right] \varepsilon$$

$$D = 1 - \xi$$

$$\varepsilon = \frac{45 (\nu_0 - \nu) (2 - \nu)}{16 (1 - \nu^2) [D(1 + 3\nu_0)(2 - \nu) - 2(1 - 2\nu_0)]}$$

Tabla 13. Resultados de parámetro de densidad de fisuras

Nombre núcleo	$E_d$ (skd) [Gpa]	$E_d$ (dry) [Gpa]	$\nu_{skd}$	$\nu_{dry}$	$\varepsilon$
M5A	20	18	0.245	0.202	0.075
M5B	19	17	0.252	0.191	0.105
M5C	21	19	0.242	0.208	0.059
M4A	23	20	0.254	0.186	0.117
M4 B	27	25	0.246	0.202	0.076
M4C	25	23	0.247	0.200	0.081
M3A	30	29	0.235	0.222	0.023
M3B	30	30	0.231	0.228	0.007
M3C	31	30	0.238	0.215	0.040

## 2.5 Análisis de resultados

### 2.5.1 Análisis de resultados de Velocidad de pulso (Vp)

En la figura 18 se presentan los resultados de Velocidad de pulso (Vp) para cada núcleo de hormigón en estado mojado (color azul) y en estado seco (color rojo), estos valores se obtienen a partir de las tablas 5 y 9. 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.

Por otro lado, se analiza que los valores de Vp para cada núcleo son precisos ya que tienden a ser similares dentro de su propia mezcla. Por ejemplo, Vp para estado mojado de la mezcla M5 está en un rango entre 3718 m/s y 3870 m/s; Vp de mezcla 4 entre 3926 m/s a 4085 m/s; y Vp de mezcla 3 entre 4280 m/s y 4344 m/s.

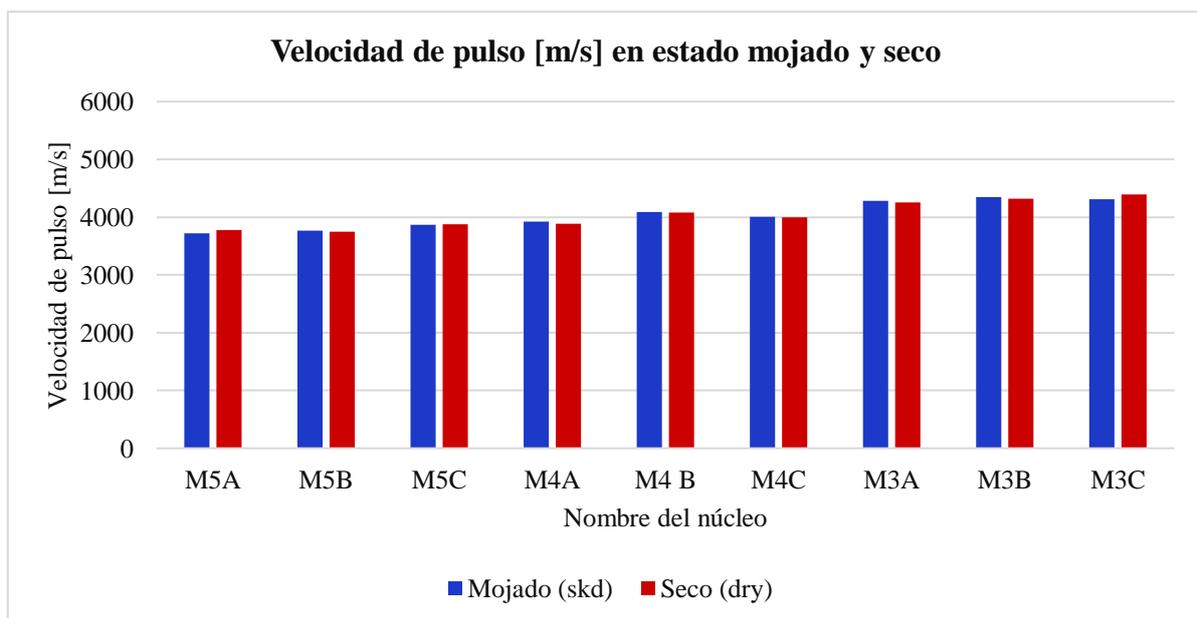


Figura 18. Histograma de resultados de Velocidad de pulso (Vp) en estado mojado y seco

### 2.5.2 Análisis de resultados de Velocidad de corte (Vs)

Analizando la figura 19, la cual presenta resultados de velocidad de corte en estado mojado (azul) y estado seco (rojo), se observa que no existe coherencia entre los datos,

comparándolos con la figura 18. 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.

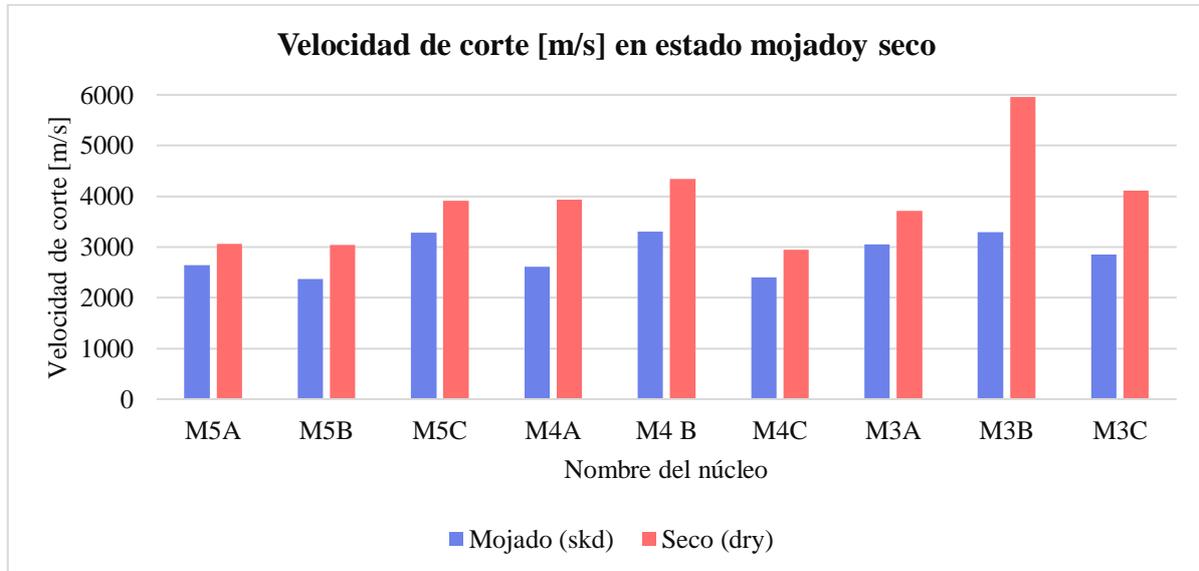


Figura 19. Histograma de resultados de Velocidad de corte ( $V_s$ ) en estado mojado y seco

### 2.5.3 Análisis de resultados en estado mojado de Velocidad de Pulso ( $V_p$ ) y Velocidad de corte ( $V_s$ ).

La figura 20 es una comparación de los resultados de Velocidad de pulso (azul fuerte) y velocidad de corte (azul tenue) en estado mojado (obtenida de la tabla 5). Se observa que los valores para  $V_p$  son mayores que los de  $V_s$ . Se deduce que los mismos son confiables ya que obedecen la teoría de que la onda de pulso es más rápida que la onda de corte.

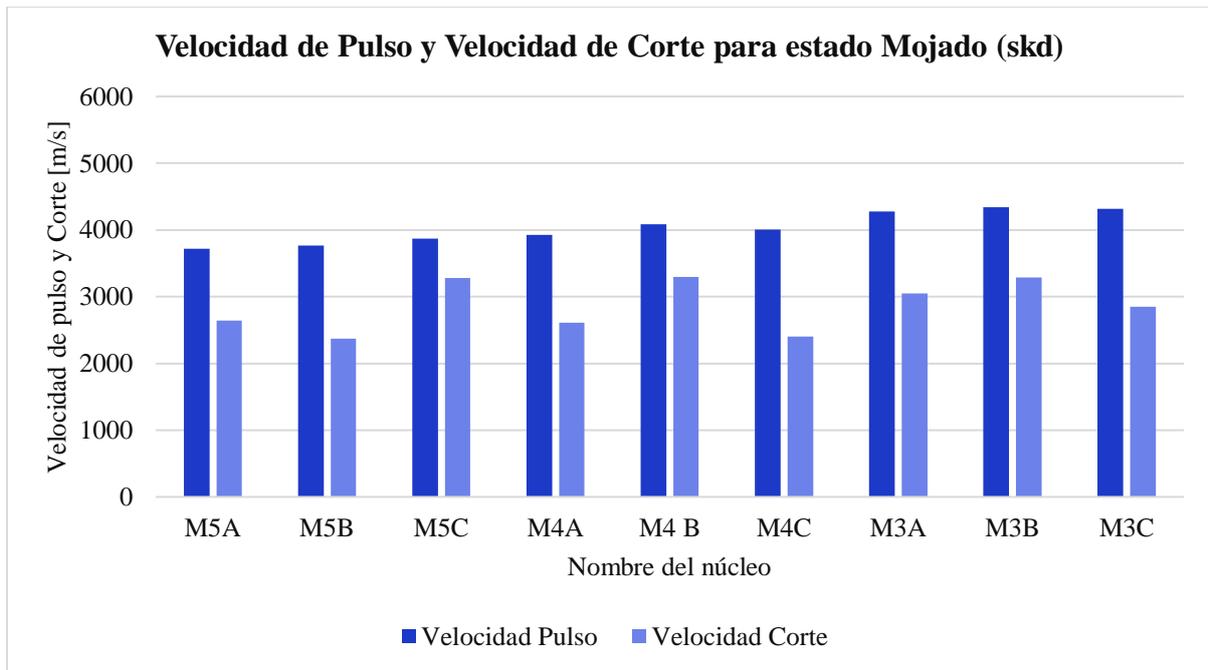


Figura 20. Velocidad de pulso ( $V_p$ ) y Velocidad de corte ( $V_s$ ) en estado mojado (skd)

#### 2.5.4 Análisis de resultados en estado seco de Velocidad de pulso ( $V_p$ ) y Velocidad de corte ( $V_s$ ).

La figura 21 es una comparación de Velocidad de pulso (rojo intenso) y Velocidad de corte (rojo tenue) en estado seco. 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. 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.

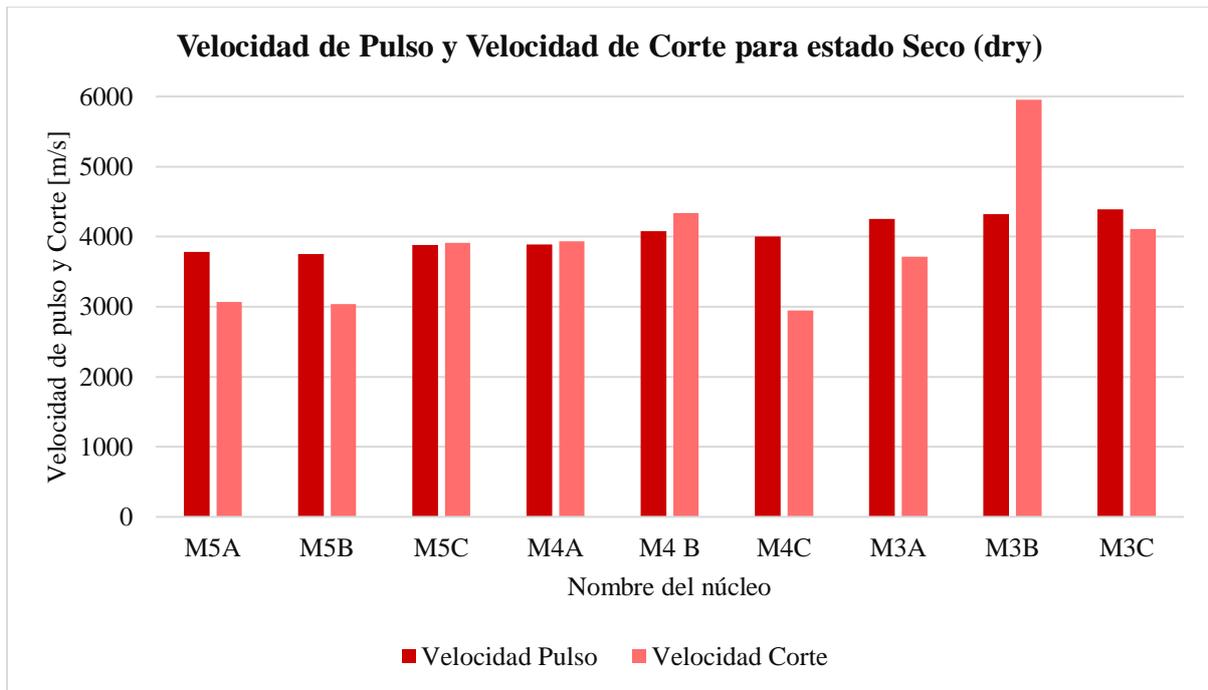


Figura 21. Velocidad de pulso ( $V_p$ ) y Velocidad de corte ( $V_s$ ) en estado seco (dry)

### 2.5.5 Análisis de resultados del módulo de Elasticidad dinámico ( $E_d$ ).

El resultado de módulo de Elasticidad dinámico ( $E_d$ ) se obtuvo mediante dos métodos diferentes. El primero corresponde a la norma *ASTM C215-14* 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. Estos resultados se presentan en las tablas 8 (para estado mojado) y 12 (para estado seco). Es necesario un correcto cálculo del módulo de elasticidad dinámico ya que es el dato principal para la estimación del parámetro de densidad de fisuras. De igual forma, los resultados de  $E_d$  calculados por ambos métodos deben arrojar resultados similares entre ellos. La figura 22 muestra los valores de  $E_d$  para estado seco y mojado obtenidos mediante la norma *ASTM C215-14*. Se observa que para estado mojado (azul) el  $E_d$  es mayor que para estado seco (rojo), esto obedece el modelo matemático de O'Connell & Budiansky (1974).

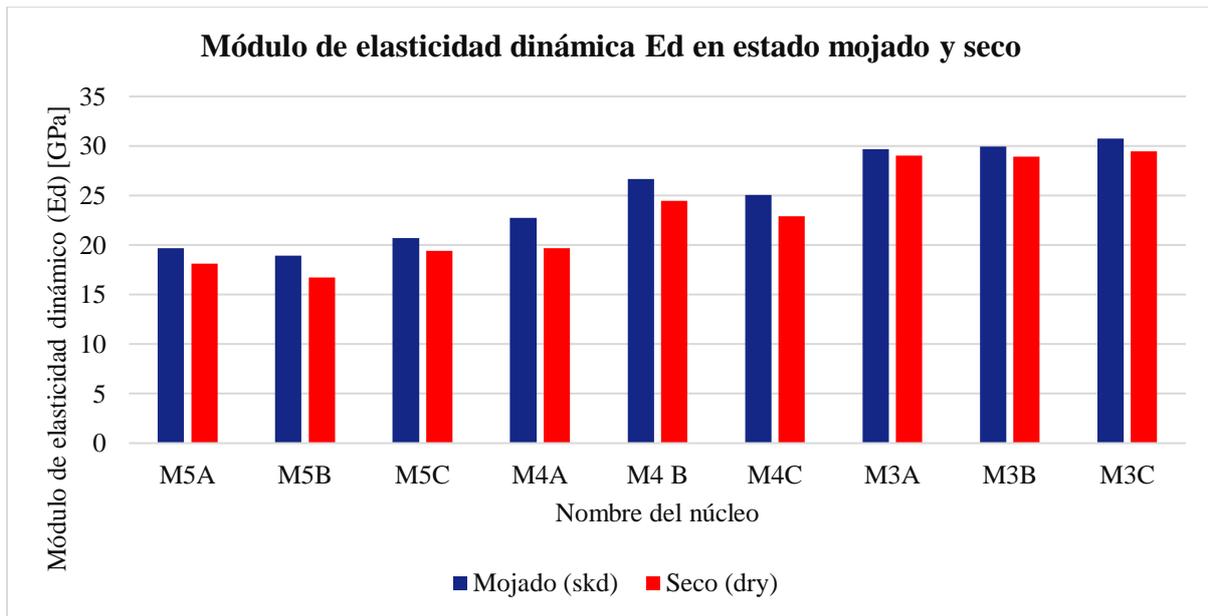


Figura 22. Módulo de elasticidad dinámica (Ed) mediante ASTM C215-14 seco y mojado

Para analizar qué método relación  $V_p - V_s$  (azul intenso) o *ASTM C215-14* (azul tenue) arroja resultados más confiables, se realizó la comparación presentada en la figura 23 para estado mojado. Se observa que para este acondicionamiento si existe similitud entre los resultados de ambos métodos, especialmente en la mezcla 4. Esto es un buen indicador, ya que sugiere que es posible obtener resultados precisos mediante el uso de ondas de esfuerzo.

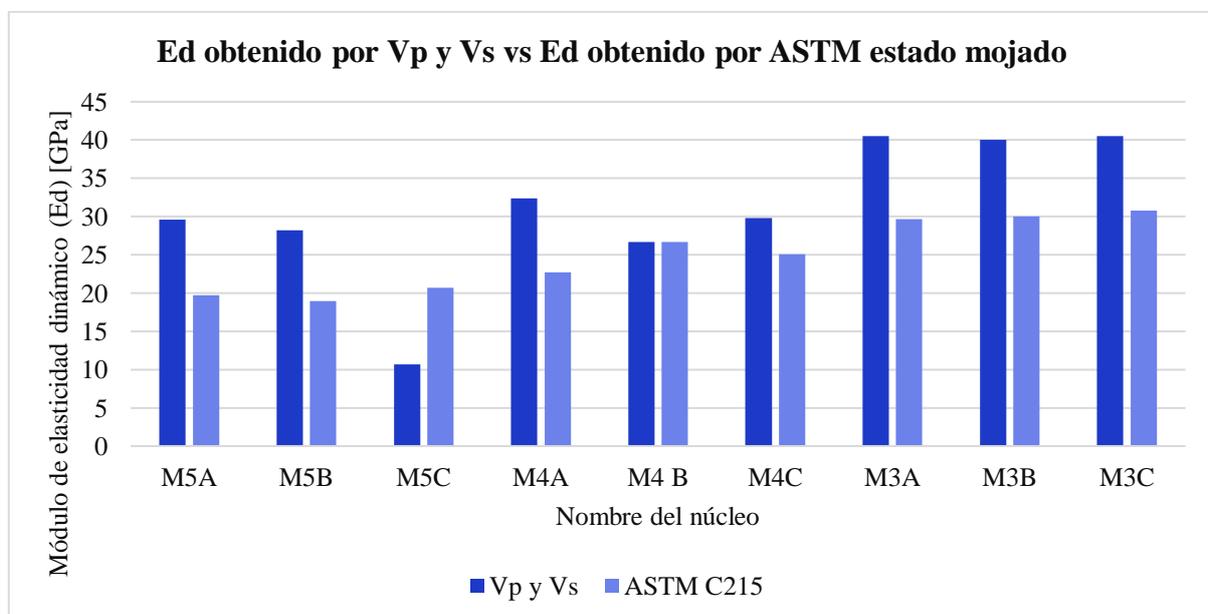


Figura 23. Comparación de resultados del Módulo de elasticidad dinámica (Ed) obtenido mediante  $V_p - V_s$  y por ASTM C215-14 en estado mojado

Se realizó la misma comparación, pero para estado seco, esto se presenta en la figura 24. En este caso no existe ninguna similitud entre los resultados de ambos métodos. Los resultados mediante  $V_p - V_s$  (rojo intenso) son bastante variables, algunos núcleos arrojan valores negativos como es el caso de M3A y M3C o son significativamente altos, superando los 1000 GPa como M4A y M4B.

Por lo tanto, se determina que los valores de  $E_d$  conseguidos mediante la fórmula que integra  $V_p$  y  $V_s$  no son confiables. Por esta razón se descarta su uso para la estimación del parámetro de fisuras ( $\epsilon$ ).

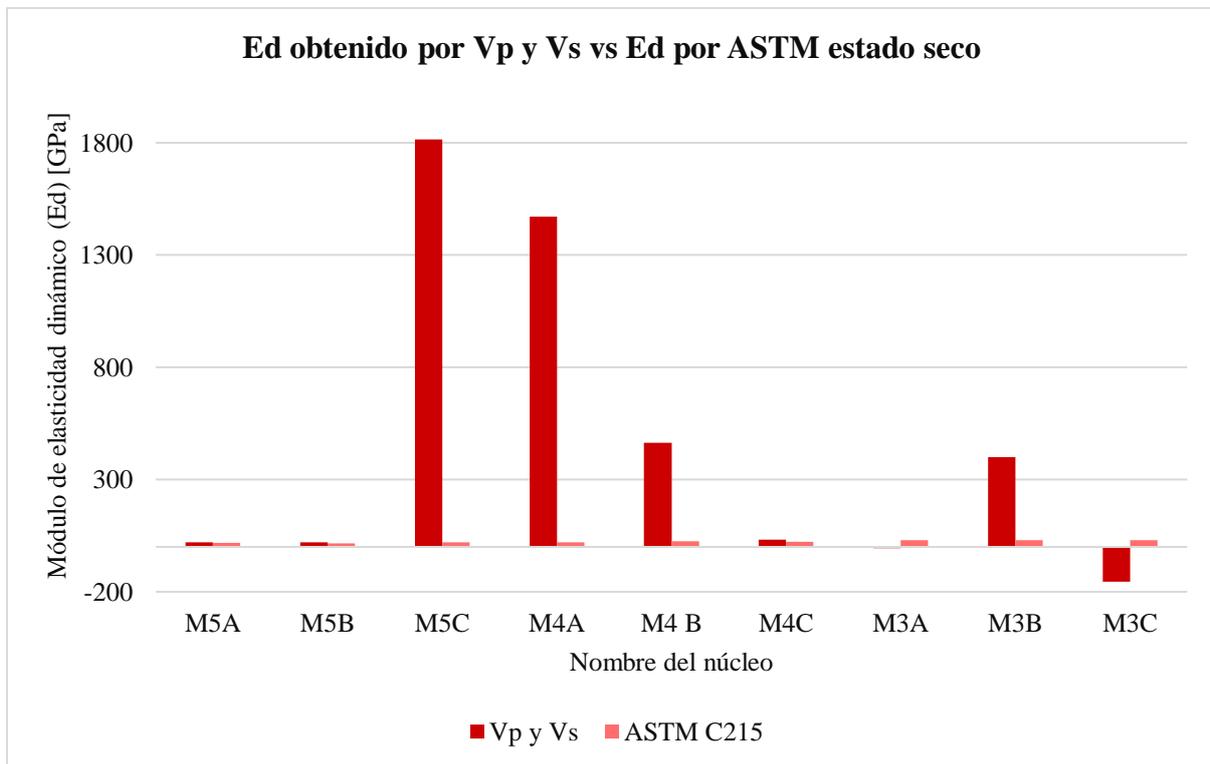


Figura 24. Comparación de resultados del Módulo de elasticidad dinámica ( $E_d$ ) obtenido mediante relación  $V_p$ ,  $V_s$  y ASTM C215-14 en estado seco

### 2.5.6 Análisis de resultados del parámetro de densidad de fisuras para cada mezcla (M5, M4 y M3).

Se obtuvieron los siguientes resultados para la estimación del parámetro de densidad de fisuras para cada mezcla. Los mismos son bajos ya que se esperaban valores mayores a 0.2 de acuerdo a análisis anteriores como en el trabajo de titulación de Moreno (2018).

Tabla 14. *Resumen de resultados del parámetro de densidad de fisuras para cada mezcla*

Nombre Mezcla	Parámetro densidad de fisuras $\epsilon$
M5	0.08
M4	0.09
M3	0.02

A continuación, se presentan 3 gráficas, una para cada mezcla (M5, M4 y M3), las cuales muestran la relación entre el parámetro de densidad de fisuras (variable X) y el módulo de elasticidad dinámica (variable Y). Dentro de la gráfica de cada mezcla están los resultados de los 3 núcleos de hormigón (A, B y C).

Las líneas gruesas corresponden a resultados en estado mojado (skd) y las líneas entrecortadas a estado seco (dry). El color azul representa los núcleos A, color rojo núcleos B y color verde núcleos C. Esta notación se utilizó para todas las 3 mezclas.

En general se observa que los valores del módulo de elasticidad dinámico en núcleos en estado mojado son mayores que en estado seco. Esto obedece al modelo propuesto por Budiansky & O'Connell. Se observa que la mezcla 3 (M3) presenta valores de módulo de elasticidad mayores, mientras que, valores menores corresponden a la mezcla 5 (M5). Con respecto al parámetro de densidad de fisuras se observa que la mezcla 4 (M4) tiene valores mayores y la mezcla 3 (M3) tiene los menores resultados.

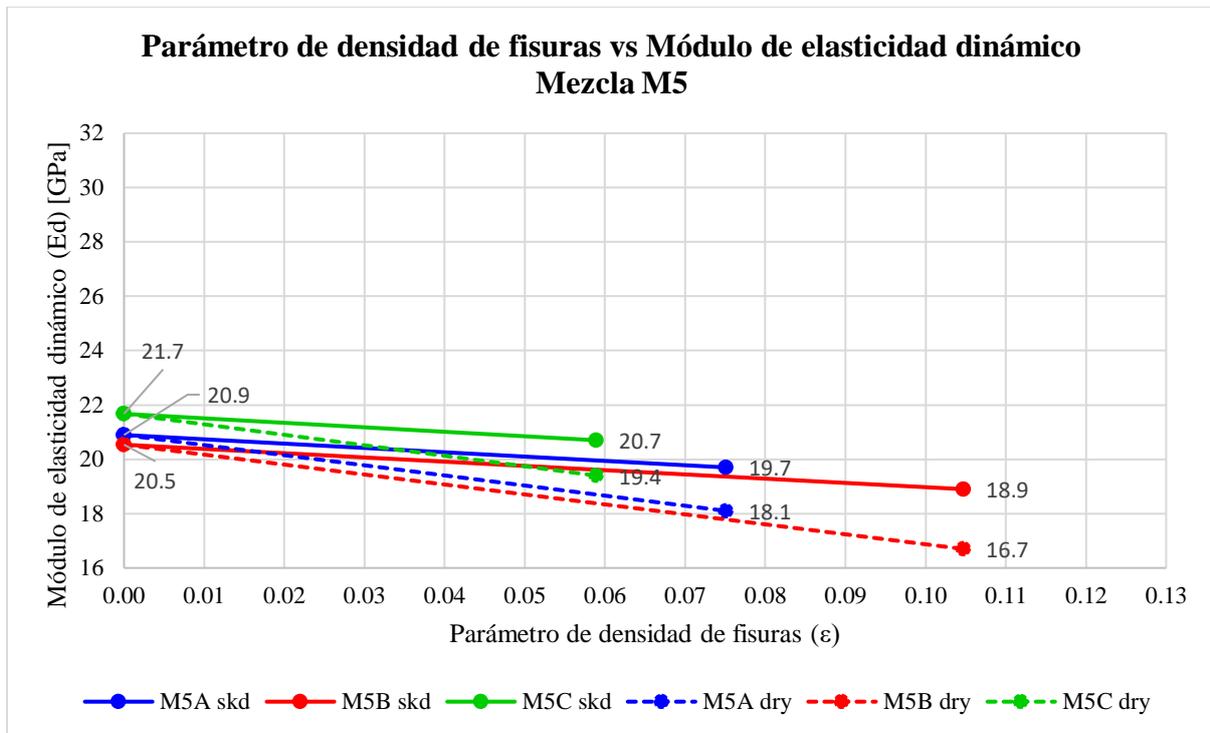


Figura 25. Relación entre el parámetro de densidad de fisuras y el módulo de elasticidad dinámico para los núcleos de la mezcla 5

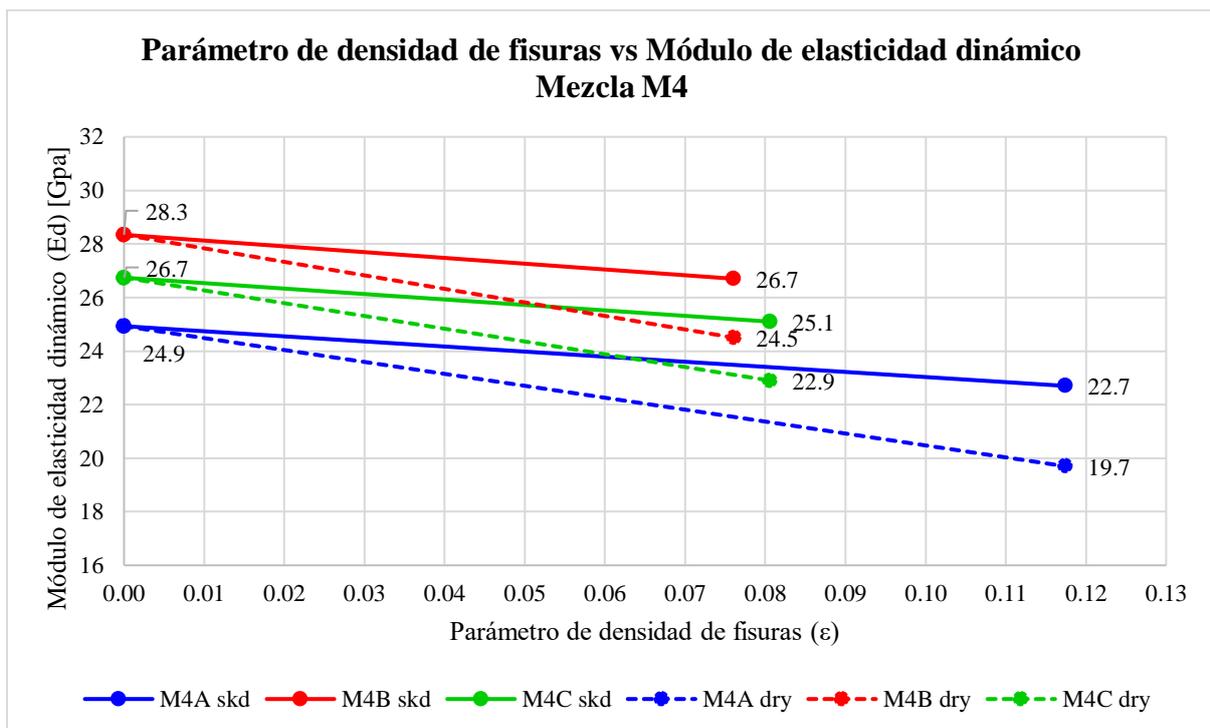


Figura 26. Relación entre el parámetro de densidad de fisuras y el módulo de elasticidad dinámico para los núcleos de la mezcla 4

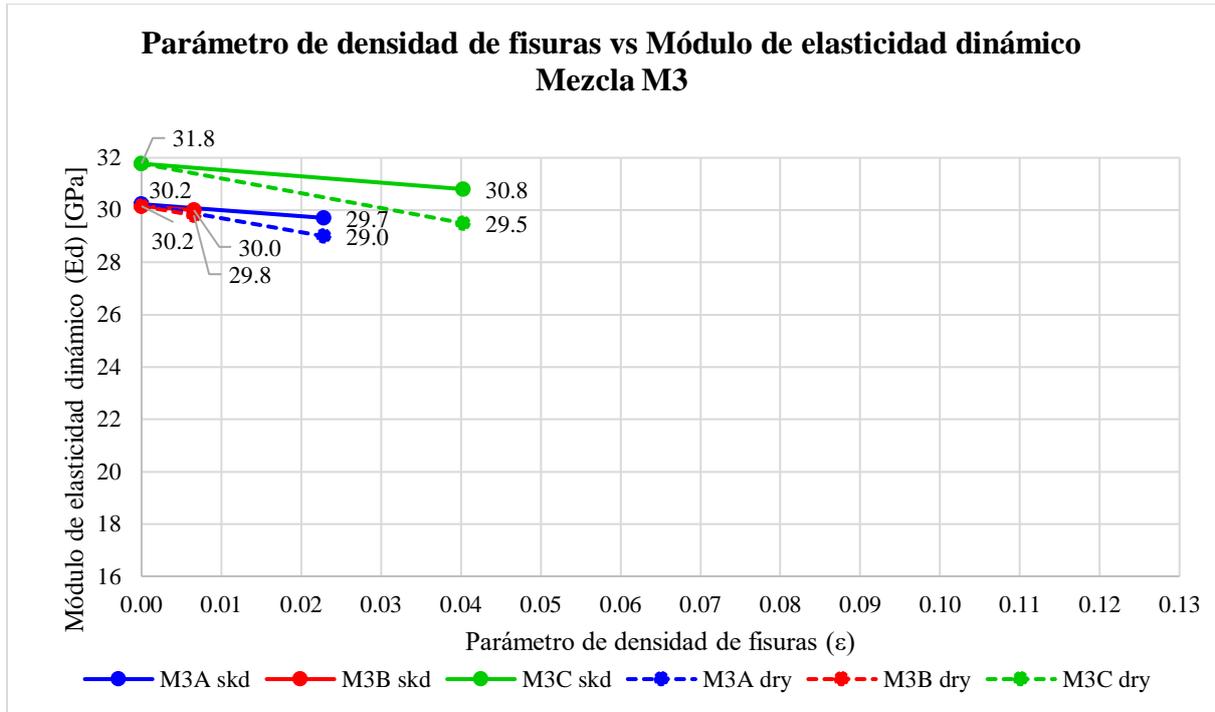


Figura 27. Relación entre el parámetro de densidad de fisuras y módulo de elasticidad dinámico para los núcleos de la mezcla 3

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 3.1 Conclusiones

De la realización del presente proyecto se concluye lo siguiente:

- a) Se extrajeron 6 núcleos de losas de hormigón tras exposición a altas temperaturas (450 °C *por dos horas*).
- b) Se logró medir velocidad de pulso, velocidad de corte y módulo de elasticidad dinámico en estado mojado y estado seco al aire en los 9 núcleos de hormigón.
- c) Los valores de velocidad de pulso mediante norma *ASTM C597* y módulo de elasticidad dinámico *ASTM C215-14* fueron obtenidos de manera confiable para estados mojado (skd) y seco (dry).
- d) Debido a que no existe norma ASTM que especifique procedimientos para la determinación de velocidad de corte se creó un método basado en el uso de transductores. Sin embargo, no se pudo obtener resultados de velocidad de corte, por lo que la medición se realizó mediante un método de impacto. Los valores obtenidos no fueron confiables.
- e) Para el estado mojado si se obtuvieron valores coherentes de  $V_s$  debido a que los mismos eran menores a  $V_p$ , obedeciendo de esta forma la teoría. Sin embargo, los resultados de velocidad de corte para el estado seco al aire no son confiables, ya que se obtuvieron valores mayores a su respectivo  $V_p$ .
- f) Debido a la variabilidad en los resultados de velocidad de corte ( $V_s$ ), es preferible estimar el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) mediante el método de ensayo *ASTM C215-14* que mediante la relación entre velocidad de pulso ( $V_p$ ) y velocidad de corte ( $V_s$ ).
- g) Se pudo aplicar el modelo de O'Connell & Budiansky para estimar el parámetro de densidad de fisuras de núcleos de hormigón para las tres mezclas.

- h) Se obtuvieron los siguientes resultados para el parámetro de densidad de fisuras: 0.08 para M5, 0.09 para M4 y 0.02 para M3. Dichos resultados son bajos ya que se esperaban valores mayores a 0.2 porque de acuerdo a la teoría este parámetro debe ser mayor en elementos dañados.

### 3.2 Recomendaciones

Tras la realización del presente proyecto se recomienda lo siguiente para futuras investigaciones:

- a) Para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico utilizar la norma *ASTM C215-14* ya que presenta resultados coherentes y precisos.
- b) No utilizar valores de  $V_s$  para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico debido a su falta de confiabilidad.
- c) En el caso de continuar el estudio con ondas de esfuerzo como lo son  $V_p$  y  $V_s$ , desarrollar nuevos métodos para la determinación de  $V_s$  que impliquen aparatos transductores más sensibles y técnicas de impacto más precisas.
- d) Considerar también que los valores de  $V_s$  obtenidos en estado mojado si fueron coherentes.
- e) 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.
- f) Obtener discos a partir de los núcleos extraídos para continuar con la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

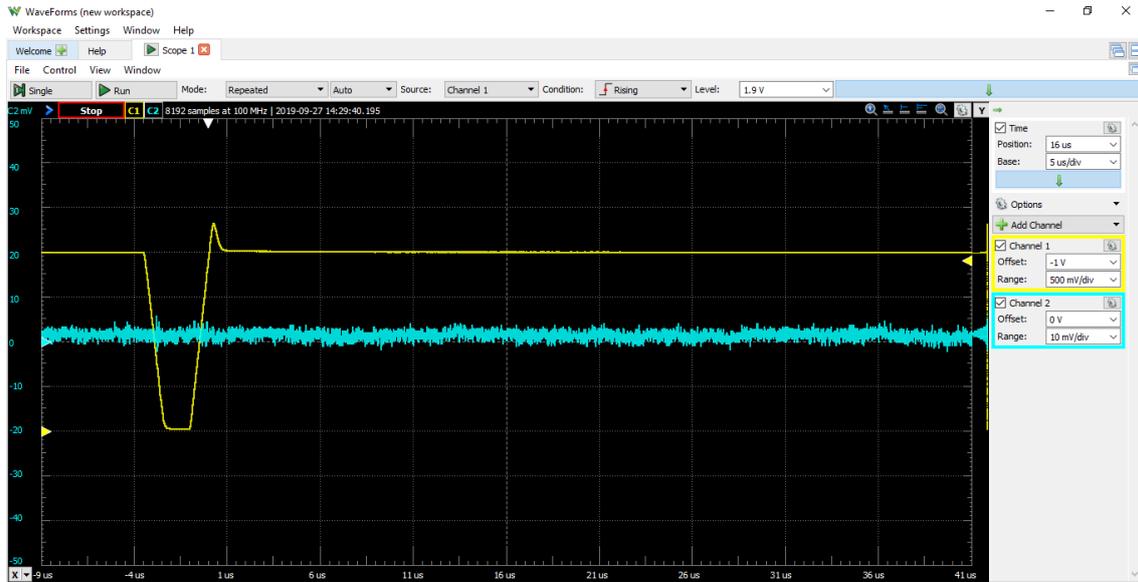
- ACI Committee 228, "228.2R-13 *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*" American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013.
- ACI Committee 318, "318-14: *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*," ACI American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.
- ASTM C215-14. (2014). ASTM International. *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*, 1–7. Obtenido el 6 de abril de 2020 de <https://www.astm.org/>
- ASTM C597-09. (2009). ASTM International. *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, 1–4. Obtenido el 6 de abril de 2020 de <https://www.astm.org/>
- ASTM C42-16. (2016). ASTM International. *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*. Obtenido el 6 de abril de 2020 de <https://www.astm.org/>
- Budiansky, B., & O'Connell, R. J. (1974). *Seismic Velocities in Dry and Saturated Cracked Solids*. *Journal of Geophysical Research*, 79(36), 5412-5426
- Ercolani, G. D., Ortega, N. F., & Señas, L. (2007, October). *Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas*. In *Proceedings IV Conferencia Panamericana de END*
- Huo, J., Jin, B., Yu, Q., He, Y., & Liu, Y. (2016). *Effect of microstructure variation on damage evolution of concrete at high temperatures*. *ACI Materials Journal*, 113(5), 547-558. doi:<http://dx.doi.org/10.14359/51689102>
- 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
- Madariaga, R. (1989). *Propagación de ondas sísmicas en el campo cercano*. Paris, Francia: Instituto de Física de Globo de Paris.
- Moreno, A. (2018). *Estimación del parámetro de densidad de microfisuras en el hormigón mediante ondas de esfuerzo*. Universidad San Francisco de Quito.
- Recalde, J. J. (2009). *Estimating Crack Growth in Temperature Damaged Concrete*. Raleigh: North Carolina State University
- Silva, O. (2017). *Ensayo de pulso ultrasónico en el concreto, algunas ventajas*. Obtenido el 4 de febrero de 2020 de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/pulso-ultrasonico-en-el-concreto>
- TEIDE. (2013). *Historia del hormigón*. Obtenido el 4 de febrero de 2020 de <http://www.prefabricadosteide.com/historia-del-hormigon/>

Wight, J & MacGregor, J. (2015). *Reinforced Concrete. Mechanics and Design*. New Jersey, United States: Pearson.

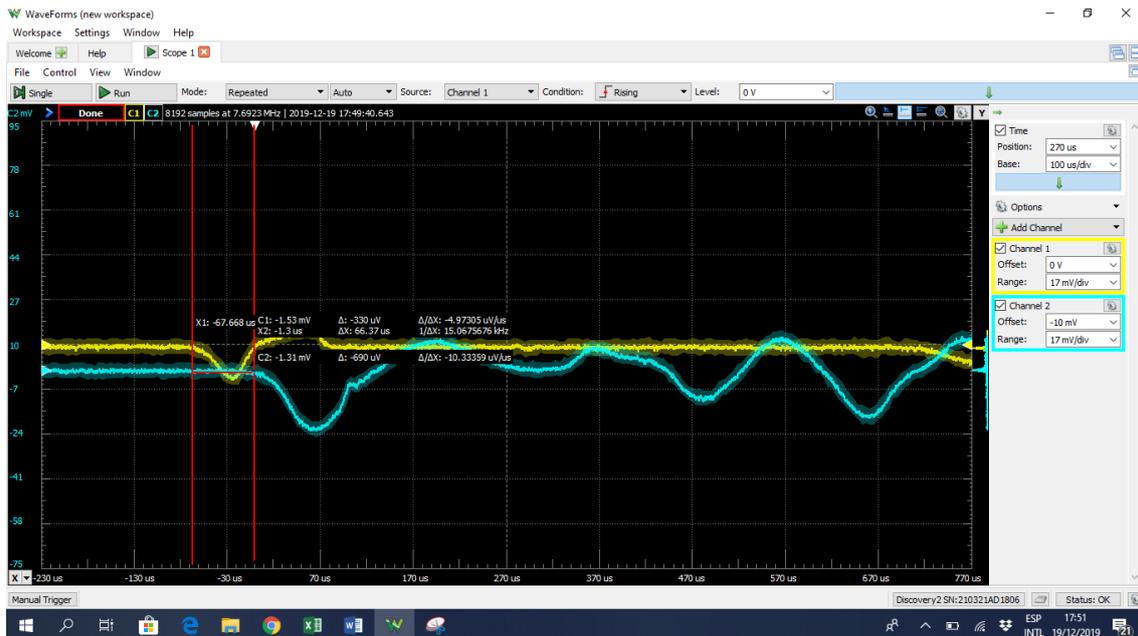
Živor, Ro., Vilhelm, J., Rudajev, V. & Lokajíček, T. (2011). *Measurement of p- and s-wave velocities in a rock massif and its use in estimating elastic moduli*. Obtenido el 11 de mayo de 2020 de

[https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta\\_content/2011\\_02/6\\_Zivor.pdf](https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta_content/2011_02/6_Zivor.pdf)

## ANEXO A: ONDA DE CORTE MEDIDA ÚNICAMENTE CON MÉTODO DE TRANSDUCTORES



## ANEXO B: ONDA DE CORTE MEDIDA CON MÉTODO DE TRANSDUCTORES MÁS IMPACTO



**ANEXO C: VELOCIDAD DE PULSO ESTADO MOJADO Y ESTADO SECO**

Nombre núcleo	Longitud núcleo [mm]	Estado mojado (skd)		Estado seco (dry)	
		Transit time [0.1us]	Vp [m/s]	Transit time [0.1us]	Vp [m/s]
M5A	201.50	54.9	3661	53.10	3785
M5A	200.92	53.7	3743	53.10	3785
M5A	200.10	53.6	3750	53.30	3771
Promedio	201.00	54.1	3718	53.17	3780
M5B	201.78	53.1	3785	53.60	3750
M5B	201.18	53.6	3750	53.60	3750
M5B	201.46	53.5	3757	53.50	3757
Promedio	201.00	53.4	3764	53.57	3752
M5C	201.18	52.0	3865	52.10	3858
M5C	201.10	52.2	3851	51.70	3888
M5C	200.90	51.6	3895	51.70	3888
Promedio	201.00	51.9	3870	51.83	3878
M4A	200.80	51.2	3926	51.80	3880
M4A	201.18	51.4	3911	51.70	3888
M4A	200.90	51.0	3941	51.70	3888
Promedio	201.00	51.2	3926	51.73	3885
M4B	200.88	49.2	4085	49.30	4077
M4B	200.00	49.2	4085	49.30	4077
M4B	200.94	49.2	4085	49.30	4077
Promedio	201.00	49.2	4085	49.30	4077
M4C	204.52	51.1	4012	51.30	3996
M4C	204.12	51.1	4012	51.20	4004
M4C	205.00	51.2	4004	51.30	3996
Promedio	205.00	51.1	4009	51.27	3999
M3A	204.00	47.5	4295	47.80	4268
M3A	203.20	47.8	4268	48.20	4232
M3A	203.40	47.7	4277	47.80	4259
Promedio	204.00	47.7	4280	47.93	4253
M3B	202.10	46.4	4353	46.70	4325
M3B	202.80	46.5	4344	46.70	4325
M3B	202.16	46.6	4335	46.80	4316
Promedio	202.00	46.5	4344	46.73	4322
M3C	200.80	46.3	4341	45.80	4389
M3C	201.10	46.7	4304	45.80	4389
M3C	201.00	46.8	4295	45.80	4389
Promedio	201.00	46.6	4313	45.80	4389

**ANEXO D: VELOCIDAD DE CORTE ESTADO MOJADO Y ESTADO SECO**

Nombre	Longitud [mm]	Estado mojado (skd)		Estado seco (dry)	
		$\Delta$ ts [us]	Vs [m/s]	$\Delta$ ts [us]	Vs [m/s]
M5A	201.50	78.0	2582	64.57	3121
M5A	200.92	71.8	2800	63.38	3170
M5A	200.10	78.9	2535	68.92	2903
Promedio	201.00	76.2	2639	65.62	3065
M5B	201.78	81.6	2472	77.13	2616
M5B	201.18	88.8	2266	60.99	3299
M5B	201.46	85.2	2365	62.78	3209
Promedio	201.00	85.2	2368	66.97	3041
M5C	201.18	54.7	3677	50.22	4006
M5C	201.10	66.7	3014	50.22	4004
M5C	200.90	63.9	3146	53.81	3734
Promedio	201.00	61.8	3279	51.42	3915
M4A	200.80	77.5	2591	50.22	3998
M4A	201.18	78.9	2549	52.02	3867
M4A	200.90	74.4	2699	51.12	3930
Promedio	201.00	77.0	2613	51.12	3932
M4B	200.88	61.9	3246	44.78	4486
M4B	200.00	60.5	3304	44.89	4455
M4B	200.94	60.1	3344	44.84	4481
Promedio	201.00	60.8	3298	44.84	4474
M4C	204.52	83.9	2439	73.54	2781
M4C	204.12	85.7	2383	63.83	3198
M4C	205.00	86.1	2381	71.75	2857
Promedio	205.00	85.2	2401	69.71	2945
M3A	204.00	70.0	2916	56.50	3611
M3A	203.20	66.4	3062	57.40	3540
M3A	203.40	64.1	3172	51.12	3979
Promedio	204.00	66.8	3050	55.01	3710
M3B	202.10	67.7	2985	33.18	6091
M3B	202.80	61.4	3301	32.29	6281
M3B	202.16	56.5	3578	36.75	5501
Promedio	202.00	61.9	3288	34.07	5958
M3C	200.80	68.6	2927	48.88	4108
M3C	201.10	67.3	2990	47.64	4221
M3C	201.00	76.2	2637	50.22	4002
Promedio	201.00	70.7	2851	48.91	4111

## ANEXO E: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO MEDIANTE ASTM C215-14

## ESTADO SECO Y MOJADO

Nombre	Masa [g]	Diámetro arriba [mm]	Diámetro abajo [mm]	Estado mojado (skd)		Estado seco (dry)	
				$\Delta t$ 10 ciclos [ms]	Frecuencia [Hz]	$\Delta t$ 10 ciclos [ms]	Frecuencia [Hz]
M5A	3048.00	94.5	95	2.25	4450	2.31	4331
M5A	3047.00	95.7	94	2.26	4425	2.31	4322
M5A	3047.00			2.26	4433	2.30	4355
Promedio	3047.00	95.0			4436		4336
M5B	3072.00	95.3	95	2.30	4355	2.39	4184
M5B	3072.00	95.4	96	2.31	4331	2.41	4153
M5B	3072.00			2.29	4365	2.40	4175
Promedio	3072.00	95.2			4350		4171
M5C	3048.50	94.4	94	2.23	4478	2.26	4425
M5C	3049.50	93.9	95	2.23	4478	2.26	4425
M5C	3048.50			2.23	4486	2.26	4433
Promedio	3049.00	94.3			4481		4427
M4A	3065.50	94.9	95	2.11	4744	2.23	4486
M4A	3065.00	94.9	95	2.09	4776	2.23	4478
M4A	3065.50			2.11	4735	2.23	4478
Promedio	3065.00	95.0			4751		4481
M4B	3094.00	95.3	95	1.96	5115	2.01	4978
M4B	3094.00	95.2	95	1.96	5115	2.03	4933
M4B	3094.50			1.95	5139	2.02	4946
Promedio	3094.00	95.0			5123		4952
M4C	3050.00	94.9	94	2.07	4824	2.14	4684
M4C	3050.00	94.7	95	2.09	4796	2.14	4666
M4C	3050.00			2.07	4824	2.14	4684
Promedio	3050.00	94.6			4815		4678
M3A	3185.50	94.5	95	1.93	5195	1.94	5163
M3A	3186.50	94.7	95	1.93	5173	1.94	5163
M3A	3186.00			1.93	5187	1.93	5173
Promedio	3186.00	94.8			5185		5166
M3B	3191.50	94.8	95	1.88	5311	1.91	5236
M3B	3191.50	95.1	95	1.89	5285	1.92	5222
M3B	3191.00			1.89	5297	1.91	5247
Promedio	3191.00	94.9			5298		5235
M3C	3146.50	94.0	95	1.85	5400	1.89	5285
M3C	3146.00	94.1	95	1.86	5373	1.89	5297
M3C	3146.00			1.87	5362	1.89	5285
Promedio	3146.00	94.3			5378		5235

**ANEXO F: CAPTURA DE PANTALLA DE MODELO MATEMÁTICO DE EXCEL  
PARA CÁLCULO DEL PARÁMETRO DE DENSIDAD DE FISURAS MEZCLA 5**

ID	Ed		<b>Función a minimizar</b>				
	AM5-B			433	<--	mínimo	
SKD	19.7 GPa	<-- medido	<b>Variables a cambiar</b>				
DRY	18.1 GPa	<-- medido	E <sub>0</sub>	20.89			
			v <sub>skd</sub>	0.245			
			v <sub>dry</sub>	0.202			
<b>Model</b>			<b>Restricciones</b>				
v <sub>0</sub>	0.23	<-- asumido	E <sub>0</sub>	20.8948	>=	0	
E <sub>0</sub>	20.89481 GPa		v <sub>skd</sub>	0.24544	>=	0	
v <sub>skd</sub>	0.245439		v <sub>dry</sub>	0.20211	>=	0	
v <sub>dry</sub>	0.202114		v <sub>skd</sub>	0.24544	<=	0.5	
ξ <sub>skd</sub>	1	<-- asumido	v <sub>dry</sub>	0.20211	<=	0.5	
ξ <sub>dry</sub>	0	<-- asumido	ε	0.0751	=	0.0751	
D <sub>skd</sub>	0						
D <sub>dry</sub>	1		<b>Función de optimización</b>				
E <sub>skd</sub>	0.0751			Modelo	Medición	E (KPa)	E <sup>2</sup>
E <sub>dry</sub>	0.0751		skd	19.70	19.7	13	173
E <sub>skd</sub> /E <sub>0</sub>	0.9428		dry	18.10	18.1	16	261
E <sub>dry</sub> /E <sub>0</sub>	0.8662					Σ	433 minimizar
E <sub>skd</sub>	19.70 GPa						
E <sub>dry</sub>	18.10 GPa						