

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL CONCRETO USANDO
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE RESONANCIA POR
IMPACTO Y VIBRACIÓN AMBIENTAL**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

Edson Mauricio Gonzales Paliza

ASESOR: Rafael Aguilar Vélez

Lima, agosto de 2016

RESUMEN

Este trabajo explora el manejo de métodos no destructivos para la caracterización mecánica y evaluación de la calidad de concretos de mediana resistencia. Los métodos no destructivos tomados en cuenta para esta investigación fueron el ensayo de resonancia por impacto y el ensayo de vibración basado en respuestas ambientales.

Los ensayos de resonancia por impacto fueron comparados con el ensayo de resistencia a la compresión en dos campañas experimentales. La primera campaña se llevó a cabo en 20 especímenes de concreto fabricados y curados en laboratorio, con el propósito de realizar un monitoreo continuo del desarrollo del módulo de elasticidad dinámico del concreto en el tiempo. En la segunda campaña, se evaluaron 265 especímenes provenientes de diferentes proyectos de la ciudad de Lima, con finalidad de obtener una correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a la compresión. Las correlaciones preliminares fueron validadas en 181 especímenes adicionales.

Por otra parte, los ensayos de vibración ambiental se aplicaron para monitorear de forma continua el desarrollo del módulo de elasticidad estático del concreto desde el momento del vaciado. Estos resultados se compararon con los obtenidos en laboratorio a través del método tradicional de lectura del módulo de elasticidad de cuerda. Además se analizó la relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático del concreto.

La aplicación de ensayos no destructivos son de gran interés en el campo de la mecánica de materiales. En el caso del concreto permiten determinar algunas propiedades mecánicas, desde edades muy tempranas, de forma rápida y sin la necesidad de realizar largas y costosas campañas de laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

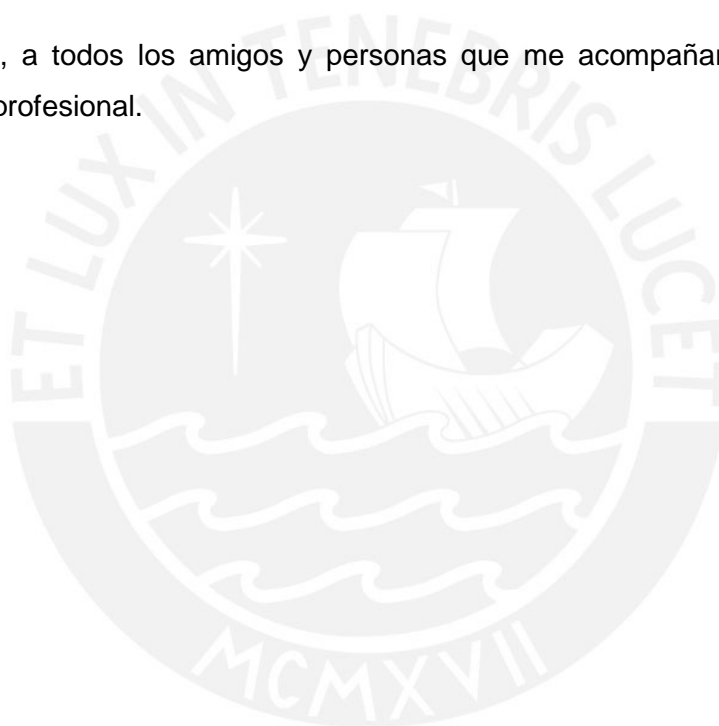
Agradezco a mi familia, en especial a mi hermano, por su apoyo incondicional.

A mi asesor por su amistad, paciencia y consejos.

Al laboratorio de Estructuras de la PUCP por permitirme realizar los ensayos en sus instalaciones.

A los docentes y al grupo de investigación E&H, por todos los conocimientos brindados.

Finalmente, a todos los amigos y personas que me acompañaron a lo largo de mi formación profesional.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN.....	2
1.2. OBJETIVOS:.....	3
1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	3
CAPÍTULO 2. MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACION MECÁNICA DEL CONCRETO	5
2.1 INTRODUCCIÓN.....	6
2.2 MÉTODOS DE CARÁCTER DESTRUCTIVO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO.....	7
2.2.1 Método estándar para obtener la resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C496, 2011).	8
2.2.2 Método estándar para calcular la resistencia a la flexión de una viga de concreto (ASTM C78, 2015).	9
2.2.3 Ensayo de tracción directa	10
2.2.4 Método estándar para obtener la Resistencia a la compresión del concreto de probetas cilíndricas (ASTM C39, 2012).	11
2.2.5 Método estándar para calcular el Módulo de Elasticidad Estático y el Módulo de Poisson del concreto en Compresión (ASTM C469, 2010).	13
2.2.6 Método estándar para estimar la resistencia del concreto utilizando el método de madurez (ASTM C1074, 2011).	15
2.3 MÉTODOS DE CARÁCTER NO DESTRUCTIVO (<i>MND</i>) PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL CONCRETO	17
2.3.1 Método estándar para obtener la frecuencia de resonancia longitudinal, transversal, y torsional en especímenes de concreto (ASTM C215, 2008).	19
2.3.2 EMM-ARM: Método para medir el Módulo de Elasticidad basado en Respuestas Ambientales (Azenha et al, 2010).	22
2.3.3 Método estándar para la velocidad de pulso a través del concreto (ASTM C59, 2009).	26
2.3.4 <i>Bender Elements (BE)</i> para la caracterización mecánica el concreto, Zhu y Kee (2010)	28
2.3.5 Ondas Electromagnéticas para la caracterización mecánica del concreto	30
2.4 CONCLUSIONES.....	32
CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE ENSAYOS DE RESONANCIA POR IMPACTO PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL CONCRETO.....	33
3.1. INTRODUCCIÓN.....	34
3.2. EVALUACIÓN DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA LONGITUDINAL Y EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (E_d) EN EL TIEMPO.	34
3.2.1 Materiales y especímenes	34
3.2.2 Ensayo de Resistencia a la compresión	36
3.2.3 Ensayo de resonancia por impacto.....	38
3.3. ENSAYOS PARA EL ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.	41
3.3.1 Materiales y especímenes	41
3.3.2 Ensayo de resistencia a la compresión	43
3.3.3 Ensayo de resonancia por impacto.....	44
3.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
3.5. CONCLUSIONES.....	51

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DEL CONCRETO.....	52
4.1. INTRODUCCIÓN.....	53
4.2. EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD OBTENIDO ACORDE ASTM C469	53
4.2.1 Equipos y procedimiento	53
4.2.2 Resultados	54
4.3. EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD OBTENIDO MEDIANTE EL MÉTODO EMM-ARM..	55
4.3.1 Materiales y especímenes	55
4.3.2 Equipos y procedimiento.....	56
4.3.3 Resultados	59
4.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	60
4.4.1 Análisis de la evolución de la frecuencia y el E_{ARM}	60
4.4.2 Análisis de la relación entre el E_d , E_{ARM} , E_{sec} , E_{tan-o} , E_{ch} , y f_c	61
4.5. CONCLUSIONES.....	64
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	65
5.1 CONCLUSIONES.....	66
5.2 TRABAJO FUTURO.....	66



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ensayo de compresión diametral: (a) esquema de ensayo, y (b) distribución de esfuerzos.....	8
Figura 2.2. Ensayo de resistencia a la flexión: (a) esquema conceptual del ensayo, (b) diagrama de esfuerzos.	9
Figura 2.3. (a) Esquema del ensayo de resistencia a la tracción directa y (b) curva esfuerzo deformación. Kim y Taha (2014)	10
Figura 2.4. Ensayo de resistencia a la compresión, se muestra (a) el esquema conceptual del ensayo, (b) una foto real de la aplicación, y (c) la curva carga-deformación de donde se obtiene la carga máxima de rotura.	11
Figura 2.5. Ensayo para obtener el módulo de elasticidad secante ASTM C469, se muestra (a) el esquema conceptual del ensayo, y (b) la curva esfuerzo-deformación.	13
Figura 2.6. Método de Madurez para obtener la resistencia del concreto; se muestra (a) el esquema del ensayo y (b) la relación resistencia madurez.	15
Figura 2.7. Esquema del método EMM-ARM para la obtención del módulo de elasticidad del concreto: (a) empotrada en uno de sus extremos y (b) simplemente apoyada	23
Figura 2.8. Crecimiento de Frecuencia de vibración fundamental en el tiempo.....	24
Figura 2.9. Métodos para obtener la <i>UPV</i> : (a) transmisión directa, (b) transmisión semidirecta y (c) transmisión indirecta.....	26
Figura 2.10. Mecanismo de funcionamiento de un <i>BE</i> conectado (a) en serie y en (b) paralelo. (c) Esquema conceptual del ensayo. (Adaptado de Zhu y Kee, 2010)	28
Figura 2.11. Esquemización del ensayo para la obtención de las propiedades mediante un <i>GPR</i> : (a) cuando se coloca un metal en la base y (b) cuando el espécimen está en contacto con el suelo. (Lai et al, 2009)	30
Figura 3.1. Análisis granulométrico de los agregados.....	34
Figura 3.2. Preparación de la mezcla: (a) dosificación en peso; (b) mezclado; y (c) vaciado, vibrado y compactado de los especímenes.	35
Figura 3.3. (a) Esquema teórico, (b) esquema real del ensayo de compresión simple y (c) tipo de falla del espécimen.	37
Figura 3.4. Equipos utilizados y configuración para el ensayo de vibración forzada: (a) DAQ más apoyo y computador (b) acelerómetro y espécimen.	38

Figura 3.5. Señal con dominio en el tiempo obtenido del espécimen M2-10 a los 17 días..... 39

Figura 3.6. Señales con dominio en la frecuencia de la probeta M2-10 a la edad de 17 días..... 39

Figura 3.7. Evolución de frecuencia de resonancia longitudinal a las edades de 1, 2, 7, 14 y 28 días para el espécimen M2-10. 40

Figura 3.8. Frecuencias de resonancia longitudinal obtenidas de los especímenes fabricados en laboratorio 40

Figura 3.9. Módulo de elasticidad dinámico del concreto en los especímenes controlados en laboratorio 41

Figura 3.10. Especímenes provenientes de obra. 41

Figura 3.11. Edad de rotura en días de los especímenes provenientes de obra. 42

Figura 3.12. Diámetro promedio de los especímenes provenientes de obra. 42

Figura 3.13. Longitud de los especímenes provenientes de obra. 42

Figura 3.14. Masa de los especímenes provenientes de obra. 43

Figura 3.15. Carga máxima (P) obtenida para cada espécimen proveniente de obra. . 43

Figura 3.16. Resistencia a la compresión de los especímenes provenientes de obra. . 43

Figura 3.17. Tipo de falla de los especímenes provenientes de obra..... 44

Figura 3.18. Frecuencia de resonancia longitudinal de los especímenes de obra..... 44

Figura 3.19. Módulo de elasticidad dinámico para los especímenes de obra..... 44

Figura 3.20. Evolución en el tiempo de la frecuencia longitudinal de los especímenes M1-9, M1-10, M2-9 y M2-10. 45

Figura 3.21. Predicción de las frecuencias de resonancia hasta los 28 días de los especímenes con edad de rotura de (a) 2 días, (b) 4 días, (c) 11 días y (d) 14 días... 46

Figura 3.22. $E_{d(28)}$ estimado en función al tiempo ($t = i$) y al $E_{d(t=i)}$ 47

Figura 3.23. Evolución y predicción en el tiempo del E_d de los especímenes con edad de rotura de (a) 2 días, (b) 4 días, (c) 11 días, (d) 14 días y (e) 28 días. 48

Figura 3.24. Resultados de la relación entre el E_d y el f_c (Aguilar et al., 2016) 49

Figura 3.25. Estimación del valor de f'_c de los especímenes elaborados en laboratorio haciendo uso de la Ecuación 3.6 obtenida de los especímenes provenientes de obra.50

Figura 3.26. Ed versus f_c obtenido para los especímenes de validación.	50
Figura 4.1. Esquema del ensayo para obtener la curva esfuerzo - deformación, (a) configuración del LVDT y (b) configuración general del ensayo	53
Figura 4.2. Tiempo de curado versus E_{sec} , E_{ch} y E_{tan-o}	55
Figura 4.3. (a) Espécimen luego del vaciado y (b) cama de vibrado	56
Figura 4.4. Configuración del espécimen para la obtención del E_{ARM}	57
Figura 4.5. (a) Conjunto de señales en el tiempo, (b) frecuencia de resonancia a las edades de 5, 10 y 650 horas.	57
Figura 4.6. Intensidad de frecuencias obtenidas.....	58
Figura 4.7. Frecuencia EMM-ARM.....	59
Figura 4.8. Desarrollo en el tiempo del E_{ARM}	59
Figura 4.9. Análisis del desarrollo de la frecuencia EMM-ARM	60
Figura 4.10. Análisis de desarrollo del módulo E_{ARM}	61
Figura 4.11. Edad de curado versus módulos E_d , E_{ARM} , E_{sec} , E_{tan-o} , y E_{ch}	61
Figura 4.12. Relación entre el E_d y el E_s obtenidos experimentalmente (Aguilar et al., 2016)	62
Figura 4.13. Desarrollo de la resistencia del concreto en el tiempo en función a diferentes expresiones predictivas.....	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Métodos destructivos utilizados para la caracterización del concreto.....	7
Tabla 2.2. Métodos no destructivos para la caracterización mecánica del concreto.....	17
Tabla 2.3. Métodos no destructivos utilizados para la caracterización mecánica del concreto.....	18
Tabla 2.4. Esquema del método de resonancia por impacto.....	19
Tabla 2.5. Ecuaciones propuestas por Haach et al. (2013) que correlacionan el E_d con el E_{ch} y la resistencia a la compresión (f_c).	22
Tabla 2.6. Relación entre la geometría, la masa, la frecuencia de resonancia y el módulo de elasticidad, en función a las condiciones de borde del espécimen.	23
Tabla 2.7. Relaciones entre f_c , y ε' ; y E_{WL} y f_c propuestas por Lay et al. (2009).....	31
Tabla 3.1. Composición de la mezcla y propiedades físicas	35
Tabla 3.2. Propiedades de los especímenes controlados en laboratorio: edad de rotura, longitud, diámetro y masa.....	36
Tabla 3.3. Resultados de resistencia a la compresión en probetas controladas en laboratorio.....	37
Tabla 4.1. Resultados obtenidos de E_{sec} , E_{ch} y E_{tan-j}	54
Tabla 4.2. Propiedades del acrílico utilizado como encofrado.....	55
Tabla 4.3. Propiedades del espécimen de concreto y el encofrado de acrílico.	58
Tabla 4.4. Ecuaciones predictivas de f_c en función de E_s	63

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN



1.1. Motivación

El control y el aseguramiento de la calidad del concreto es de suma importancia para la correcta ejecución de cualquier proyecto de infraestructura. Tradicionalmente se utiliza métodos destructivos (*MD*), en especial los ensayos a compresión, en donde la resistencia a la compresión del concreto (f_c) (ASTM C39, 2012), se usa como parámetro calidad. Los ensayos de resistencia a la compresión son llevados a cabo en especímenes cilíndricos acorde a ASTM C31 (ASTM, 2015) cuando el concreto es fabricado en obra, o ASTM C192 (ASTM, 2015) cuando el concreto es fabricado en laboratorio. Utilizar f_c con fines de evaluación, implica que los especímenes y los elementos estructurales, tengan un proceso similar de curado, tarea complicada debido a que las condiciones en que estos se encuentran son diferentes. Otra desventaja es que, al menos deben pasar siete días después del vaciado para que el valor de resistencia obtenida sea representativo. Además, f_c está sujeto a una alta variabilidad debido a diversos factores, como superficies irregulares, procesos inadecuados de fabricación, incluso accesibilidad cuando los especímenes deben ser transportados largas distancias para ser ensayados en un laboratorio. Un *MD* adicional, tradicionalmente utilizado para caracterizar el concreto, es el módulo de elasticidad (ASTM C469, 2010), este parámetro es utilizado en el análisis y diseño de estructuras, así como en proyectos de ingeniería en donde se necesita conocer el comportamiento de una estructura existente a través de modelos numéricos.

Además de los métodos destructivos (*MD*), existen una gran variedad de métodos no destructivos (*MND*) para caracterizar el concreto. Si bien los *MND* calculan de forma indirecta algunas propiedades del concreto, tienen la ventaja de que pueden ser repetidos muchas veces, de forma rápida y con un costo bajo. En esta investigación se evaluaron dos *MND*, el primero es el ensayo de vibración forzada o resonancia por impacto establecido en ASTM C215 (ASTM, 2008), el cual permite obtener el módulo de elasticidad dinámico del concreto (E_d). El segundo *MND*, denominado, "Método para la Medición del Módulo de Elasticidad basado en Respuestas Ambientales" (EMM-ARM, por sus siglas en inglés), fue propuesto por Azenha (2010) y permite evaluar mecánicamente el concreto desde que este es vaciado. Los resultados obtenidos de ambos *MND* fueron contrastados con *MD* tradicionales con la finalidad de analizar y establecer correlaciones preliminares que permitan realizar controles de calidad de forma, económica, efectiva y eficiente.

1.2. Objetivos:

El objetivo general de este trabajo es validar dos métodos no destructivos (*MND*) como herramientas de determinación in-situ del módulo de elasticidad y resistencia a compresión de especímenes de concreto.

Objetivos específicos:

- Evaluar el proceso de endurecimiento de un conjunto de especímenes fabricados en laboratorio.
- Validar relaciones disponibles entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a la compresión del concreto.
- Validar una formulación matemática desarrollada por el grupo de investigación E&H (Aguilar et al., 2016) que permita predecir la resistencia a la compresión del concreto haciendo uso de ensayos no destructivos.
- Evaluar la correlación entre el módulo de elasticidad estático y el módulo de elasticidad dinámico de concreto y su variación durante el proceso de curado,

1.3. Metodología de Trabajo

Con el fin de lograr ese objetivo, se realizaron dos campañas experimentales.

La primera campaña experimental consistió en la aplicación del método de resonancia por impactoⁱ para obtener el módulo de elasticidad dinámico del concreto (E_d). Este valor se comparó con los resultados de resistencia a la compresión simple ASTM C39ⁱⁱ. En esta campaña se trabajó con dos grupos de probetas, en donde se evaluaron 265 especímenes de concreto, cuyo origen procedía de diferentes obras de la ciudad de Lima. El segundo grupo de probetas consistió en 20 especímenes de concreto de mediana resistencia provenientes de una mezcla controlada en laboratorio.

La segunda campaña experimental consistió en la evaluación y aplicación del método EMM-ARM para la obtención del módulo de elasticidad del concreto (E_{ARM}). Así mismo, se obtuvo el módulo de elasticidad de cuerda (E_{ch}) acorde a la norma ASTM C469ⁱⁱⁱ.

ⁱ ASTM C215: Método Estándar para obtener la frecuencia de resonancia del concreto

ⁱⁱ ASTM C39: Método Estándar de resistencia a la compresión del concreto en probetas cilíndricas

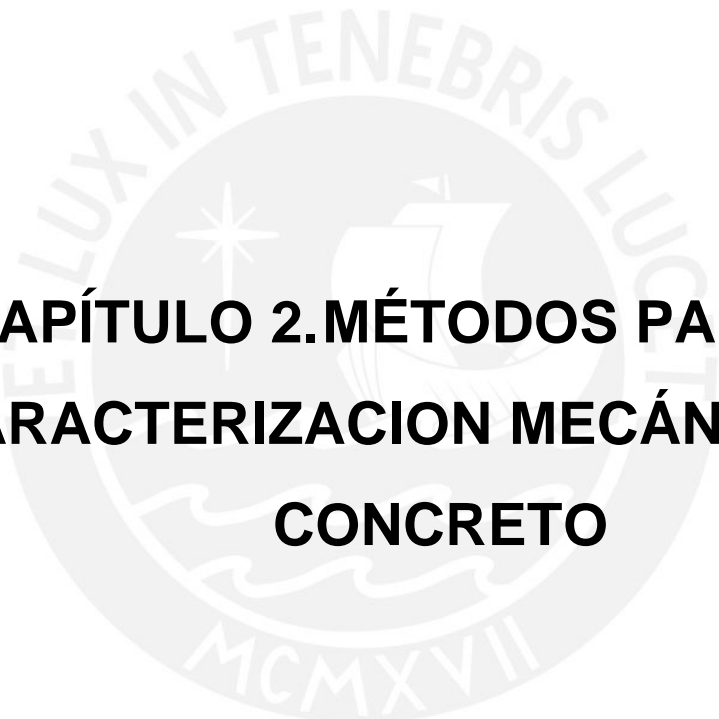
ⁱⁱⁱ ASTM C469: Método estándar para calcular el Módulo de Elasticidad Estático y el Ratio de Poisson del concreto en Compresión.

Para la obtención de E_{ch} se utilizaron un total de 20 especímenes de concreto de 6"x12", mientras que para E_{ARM} se utilizó una viga simplemente apoyada vaciada en un encofrado de acrílico. Todos los resultados métodos fueron comparados en magnitud y edad. En tanto, el concreto utilizado en toda la campaña experimental corresponden a una misma mezcla fabricada y controlada en laboratorio.

Del análisis realizado en la primera campaña experimental se espera obtener una relación entre f_c y E_d . Mientras que de la segunda campaña, se espera conocer la evolución en el tiempo del módulo de elasticidad (E_d , E_{ch} y E_{ARM}). Así mismo, se espera encontrar una relación adecuada en función del tiempo entre el modulo y la resistencia a la compresión.

El presente trabajo de investigación se compone de 5 capítulos:

- El capítulo 1 es la introducción, donde se describe brevemente el objetivo general, los objetivos específicos y la metodología del trabajo de la investigación. Además se esquematiza y resumen cada capítulo de la tesis.
- El capítulo 2 describe los principales métodos destructivos y no destructivos para determinar las propiedades mecánicas del concreto. Se detalla principalmente los ensayos de resistencia a la compresión y obtención del módulo de elasticidad.
- En el Capítulo 3 se evaluará el crecimiento del módulo de elasticidad dinámico y de la resistencia a la compresión en el tiempo. Así mismo, se investigará la relación entre estos dos parámetros y se propondrá una metodología preliminar para evaluar la calidad del concreto en términos de resistencia a la compresión.
- El Capítulo 4 contempla la evaluación del módulo de elasticidad estático del concreto y su desarrollo en función del tiempo. Esto se logrará mediante la comparación de los ensayos ASTM C469 (ASTM, 2010) y del método EMM-ARM (Azenha, 2012).
- En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones finales de esta investigación junto con miramientos para trabajos futuros.



**CAPÍTULO 2. MÉTODOS PARA LA
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL
CONCRETO**

2.1 Introducción

La resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la compresión son propiedades comunes que se utilizan para evaluar la calidad del concreto. Otra propiedad importante, es el módulo de elasticidad que si bien no se utiliza para evaluar la calidad del concreto en obra, representa un parámetro importante para el análisis y el diseño de una estructura. Para la obtención de estos parámetros tradicionalmente se hace uso de ensayos destructivos.

Si bien los ensayos destructivos son prácticos y directos, la pérdida de la muestra es inevitable. Para una caracterización apropiada y estadísticamente válida, se requiere de varias muestras por lo que las campañas de campo se hacen extensas y costosas. Los métodos destructivos comúnmente utilizados para caracterizar el concreto a tracción, flexión y compresión son los siguientes:

- Método estándar para obtener la resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C496, 2011).
- Método estándar para calcular la resistencia a la flexión de una viga de concreto con tres tipos de carga (ASTM C78, 2015).
- Método estándar para calcular la resistencia a la flexión de una viga de concreto con carga en el centro (ASTM C293, 2015).
- Ensayo de resistencia directa a la tracción, Kim y Taha (2014).
- Método estándar para obtener la Resistencia a la compresión del concreto de probetas cilíndricas (ASTM C39, 2012).
- Método estándar para calcular el Módulo de Elasticidad Estático y el Ratio de Poisson del concreto en Compresión (ASTM C469, 2010).
- Método estándar para estimar la resistencia del concreto haciendo uso del método de madurez (ASTM C1074, 2011).

Por otro lado, existen una gran variedad de *MND* para la caracterización mecánica del concreto. Una de las principales ventajas de utilizar *MND* es la replicabilidad, factor que ayuda a que el valor determinado sea representativo, ya que no se pierde el espécimen una vez realizado el ensayo. Otra ventaja, es la factibilidad de realizar los ensayos in-situ, es decir, el valor obtenido representará una propiedad intrínseca del elemento estructural, lo cual facilita la elaboración del control de calidad. Finalmente, los métodos *MND* permiten realizar procesos de monitoreo continuo para evaluar aspectos de durabilidad y resistencia en el tiempo. Existen diversos *MND* para caracterizar concreto, los más relevantes para esta investigación se muestran a continuación:

- Método estándar para obtener la frecuencia de resonancia transversal, longitudinal y torsional en especímenes de concreto, ASTM C215 (2008).
- EMM-ARM: Método para medir el módulo de elasticidad del concreto basado en respuestas ambientales, Azenha et al. (2010).
- Método estándar para obtener la velocidad de pulso a través del concreto, ASTM C597 (2009).
- *Bender Elements* para caracterizar mecánicamente el concreto, J. Zhu (2010).
- Ondas electromagnéticas para la caracterización del concreto, Lai et al. (2009).

2.2 Métodos de carácter destructivo para la caracterización del concreto

Los métodos destructivos pueden agruparse en dos conjuntos: aquellos utilizados para evaluar el comportamiento en compresión del concreto y los utilizados para evaluar el comportamiento a tracción. La Tabla 2.1 muestra qué ensayos trabajan a tracción y cuales a compresión. Asimismo, se muestra que valores se registran después de realizar cada ensayo y los parámetros obtenidos después de efectuar los cálculos.

Tabla 2.1. Métodos destructivos utilizados para la caracterización del concreto.

MÉTODOS DESTRUCTIVOS				
Comportamiento:	Basados en:	Ensayo:	Se registra:	Parámetro obtenido:
Tracción	Máximo esfuerzo resistente	Compresión Diametral ASTM C496	Carga máxima aplicada	f_{st}
		Resistencia a Flexión ASTM C78	Carga máxima aplicada	R
		Tracción directa	Carga máxima aplicada	f_t
Compresión	Máximo esfuerzo resistente	Resistencia a la Compresión Simple ASTM C39	Carga máxima aplicada	f_c
	Curva esfuerzo deformación	Módulo de elasticidad ASTM C469	Curva esfuerzo deformación	$E_{sec}, E_{ch}, E_{tan-o}$ ν
Tracción o compresión	Índice de Madurez	Método de Madurez ASTM C1074	ΔT (en el tiempo)	f_{st}, R, f_c

dónde:

f_{st} = Resistencia a la tracción indirecta del concreto.

R = Módulo de ruptura del concreto.

f_t = Resistencia a la tracción directa del concreto.

E_{ch} = Módulo de Elasticidad de cuerda del concreto.

E_{tan-o} = Módulo de Elasticidad tangente inicial del concreto.

ν = Módulo de Poisson del concreto.

E_{sec} = Módulo de elasticidad secante del concreto.

2.2.1 Método estándar para obtener la resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C496, 2011).

El ensayo de compresión diametral o *Splitting Test*, permite hallar de forma indirecta la resistencia a la tracción (f_{st}) de una muestra cilíndrica de concreto 6"x12" fabricada de acuerdo a la norma ASTM C31 (ASTM, 2015). Como se ve en la Figura 2.1(a), esto se logra aplicando una carga de compresión vertical diametral sobre el espécimen. La carga será aplicada hasta que la probeta llegue a la falla de forma continua y sin sobresaltos, procurando además que la velocidad se encuentre en el rango de 0.7 a 1.4 MPa/min.

La fuerza aplicada generará esfuerzos de tensión en el plano perpendicular a la carga forzando una falla de tracción en el espécimen. Los esfuerzos de compresión solo serán altos en los puntos de contacto entre la actuador y el espécimen, tal como se observa en la Figura 2.1(b). Debido al estado de compresión triaxial que se genera en esos puntos, la probeta difícilmente fallará por compresión. La resistencia indirecta a la tracción (f_{st}) se obtiene mediante la Ecuación 2.1, la cual está en función de la geometría y la carga máxima aplicada (P).

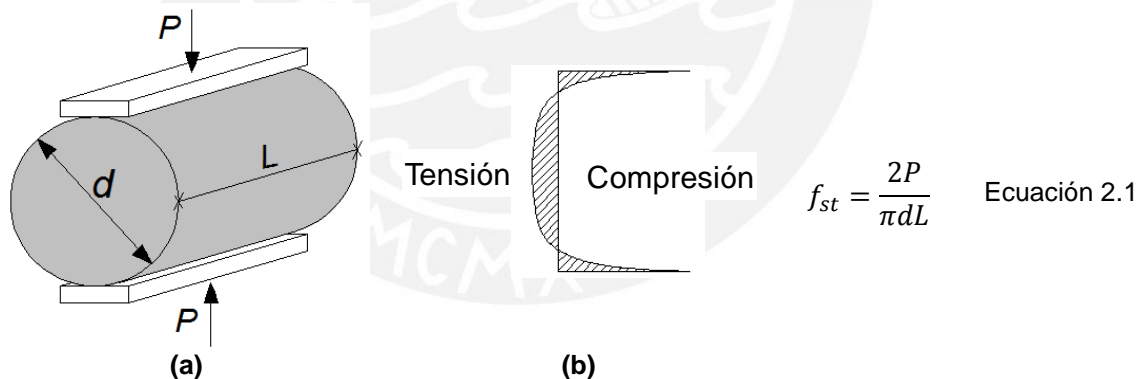


Figura 2.1. Ensayo de compresión diametral: (a) esquema de ensayo, y (b) distribución de esfuerzos.

La resistencia a la tracción del concreto es una propiedad importante debido a que existen numerosos fenómenos con los que se relaciona directamente. Los fenómenos que más se relacionan con la resistencia a la tracción del concreto son la fisuración por retracción y temperatura, la resistencia al corte del concreto y la adhesión entre el concreto y el acero (J. Raphael, 1985).

2.2.2 Método estándar para calcular la resistencia a la flexión de una viga de concreto (ASTM C78, 2015).

En el ensayo de la resistencia a la flexión, una viga prismática no reforzada de concreto (6"x6"x21"), es sometida a flexión. El parámetro obtenido en este ensayo, se denomina módulo de ruptura (R) y puede llevarse a cabo de dos maneras. El Caso 1 consiste en aplicar la mitad de la carga total en cada tercio de la viga; en este caso, el tercio central de la probeta estará sometido a flexión pura (ASTM C78, 2015). El caso 2, consiste en aplicar una carga puntal en el centro de la viga, en este caso la probeta estará sometida a esfuerzos de corte y de flexión (ASTM C293, 2015). Ambos casos se encuentran esquematizados en la Figura 2.2 (a), mientras que la distribución de esfuerzos para cada caso es presentado en la Figura 2.2 (b).

La carga se aplicará de forma continua y sin interrupciones hasta llegar a la falla. El incremento de esfuerzos de flexión en el espécimen, debe variar constantemente en un rango de 0.9 MPa/min y 1.2 MPa/min. El valor de R se calculará haciendo uso de la Ecuación 2.2 y la Ecuación 2.3, para flexión pura y flexión con corte respectivamente.

La resistencia a la flexión o R es un parámetro utilizado en el diseño y evaluación de pavimentos rígidos (Heinrichs et al,1989).

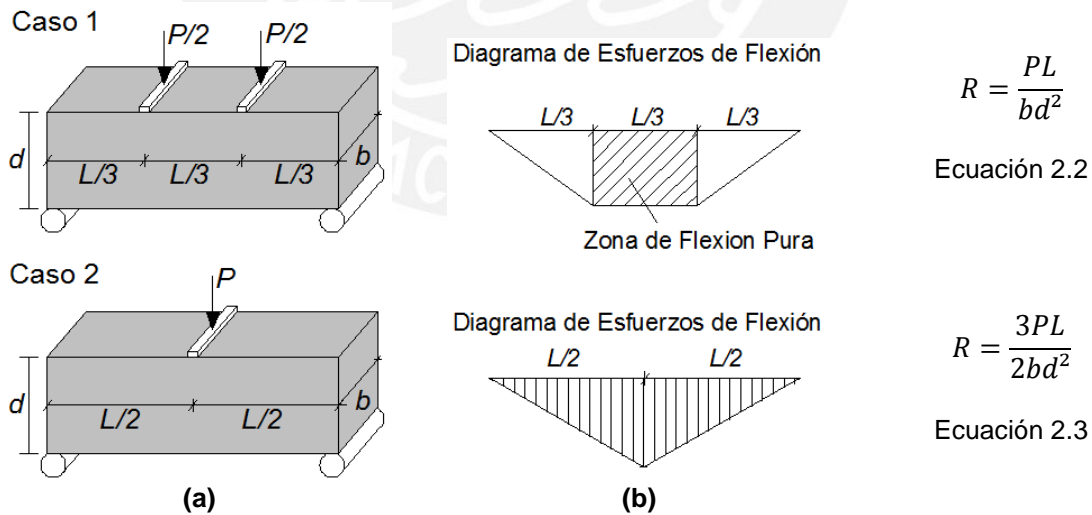
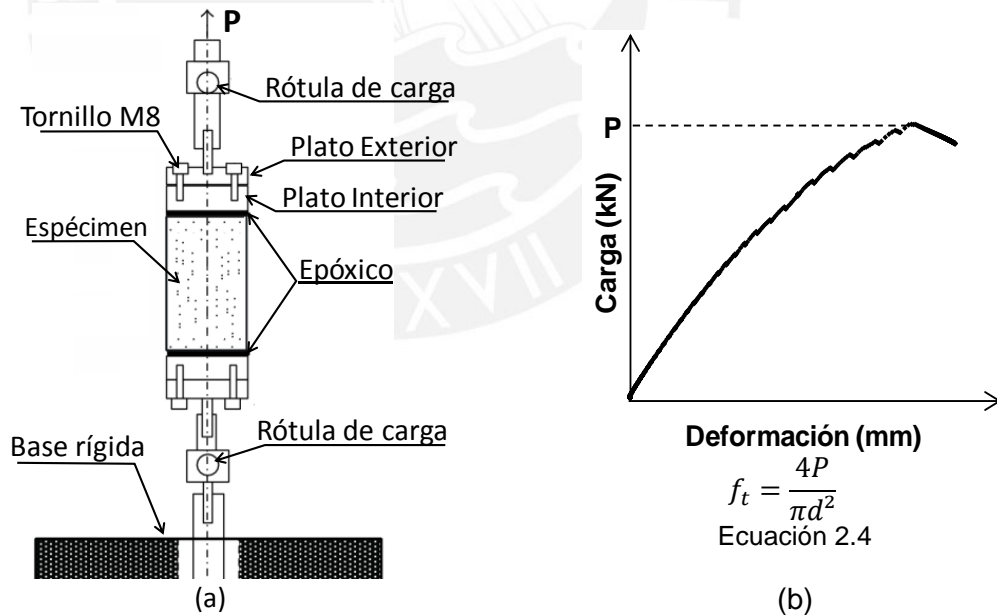


Figura 2.2. Ensayo de resistencia a la flexión: (a) esquema conceptual del ensayo, (b) diagrama de esfuerzos.

2.2.3 Ensayo de tracción directa

En el ensayo de tracción directa no se encuentra normalizado debido a que existen muchos factores que dificultan su realización. Factores como la fragilidad del concreto, influyen mucho en la forma de falla de la probeta; mientras que, la interacción cabezal/probeta suele generar esfuerzos concentrados en el espécimen. Así mismo, el valor de resistencia obtenido suele depender mucho de la forma en que se realizó el ensayo (J. Raphael, 1985).

Kim y Taha (2014) utilizó la configuración mostrada en la Figura 2.3a para realizar ensayos de tracción directa en especímenes cilíndricos de concreto (4"x8"). En este ensayo, dos platos de acero son adheridos en los extremos del espécimen por medio de una resina epóxica. A continuación, una fuerza longitudinal a la muestra es aplicada a través de una rótula de carga hasta que la probeta falle. Las rótulas de carga minimizarán los posibles efectos de corte o torsión en el espécimen. El coeficiente entre la carga de rotura (P) y el área de la sección transversal (Ecuación 2.4), dará como resultado la resistencia a la tracción directa (f_t).



dónde:

d = Diámetro de la probeta.

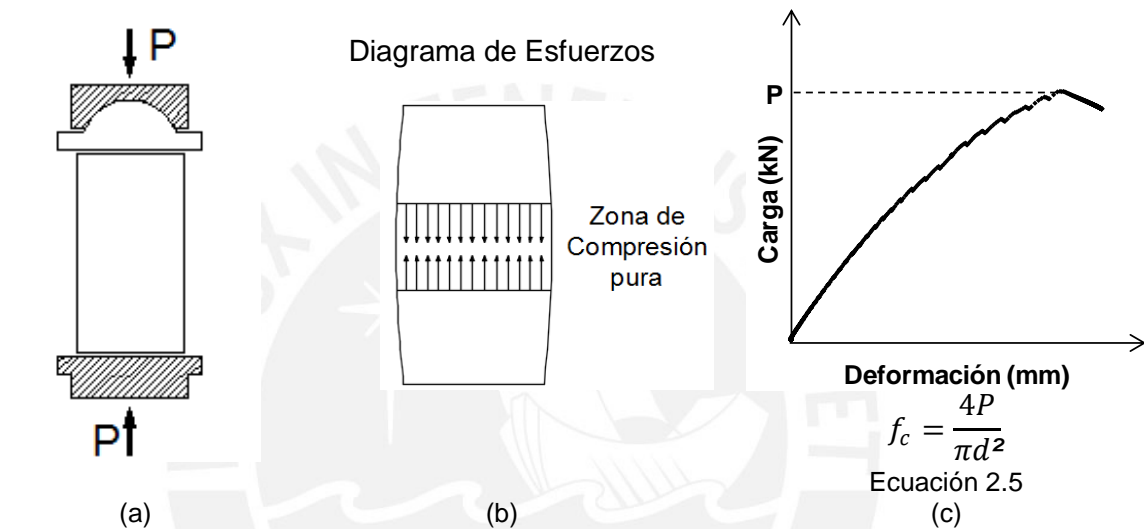
P = Carga máxima aplicada.

f_t = Resistencia a la tracción directa del concreto.

Figura 2.3. (a) Esquema del ensayo de resistencia a la tracción directa y (b) curva esfuerzo deformación. Kim y Taha (2014)

2.2.4 Método estándar para obtener la Resistencia a la compresión del concreto de probetas cilíndricas (ASTM C39, 2012).

La prueba consiste en aplicar una carga axial de compresión, a una velocidad normalizada, en un cilindro estándar de concreto hasta que se produzca el fallo. En la Figura 2.4 se muestra el esquema del ensayo y una gráfica típica del registro experimental. La resistencia a la compresión (f_c) se obtiene como la relación entre la carga máxima aplicada (P) y el área de la sección transversal (πd^2).



dónde:

f_c = Resistencia a la compresión

P = Carga máxima durante el ensayo

d = Diámetro promedio de la sección transversal del espécimen

Figura 2.4. Ensayo de resistencia a la compresión, se muestra (a) el esquema conceptual del ensayo, (b) una foto real de la aplicación, y (c) la curva carga-deformación de donde se obtiene la carga máxima de rotura.

a. Especímen, equipos y procedimiento de ensayo

El ensayo se realiza con especímenes cilíndricos que tienen dos tipos de dimensiones estándar: Probetas de 6" x 12" (150 mm x 300 mm), y probetas de 4" x 8" (100 mm x 200 mm).

El diámetro proveniente de una medición individual de un espécimen no deberá variar en más del 2% con respecto a otra medición individual del mismo espécimen. Asimismo, las probetas que no tengan superficies de contacto uniformes o que posean inclinaciones deberán ser limadas o aserradas.

El equipo de ensayo consiste en una máquina universal que deberá tener una adecuada capacidad de carga. Asimismo, deberá operar y aplicar la carga de forma continua, a velocidad adecuada y sin causar sobresaltos o paros repentinos. Los cabezales de aplicación de carga deben ser bloques de acero de caras duras, resistentes y paralelas. Uno de los bloques estará acoplado a una superficie esférica, que le permita acomodarse a la parte superior del espécimen. El bloque que se ubicara en la parte inferior de la probeta deberá estar apoyado en una base rígida.

El procedimiento consiste en medir dos veces el diámetro de la probeta a ensayaren el tramo central y con mediciones perpendiculares entre sí. Con el promedio obtenido de estas mediciones se podrá calcular el área de la sección transversal del espécimen. A continuación se colocará la probeta en la máquina de ensayo. Previamente, se verificará que las superficies de contacto, tanto de la probeta como de la máquina de ensayo se encuentren limpias. Además, es importante asegurar que no existan excentricidades en las probetas ensayadas, lo cual se logra alineando los ejes de la probeta con el eje de carga de la máquina compresora. Finalmente se aplicará la carga a una velocidad constante de modo que los esfuerzos aumenten en un ratio de 0.25 ± 0.05 MPa/s, hasta alcanzar el fallo de la probeta. Es importante también registrar el tipo de falla de la probeta para tener una noción de que la prueba se realizó correctamente.

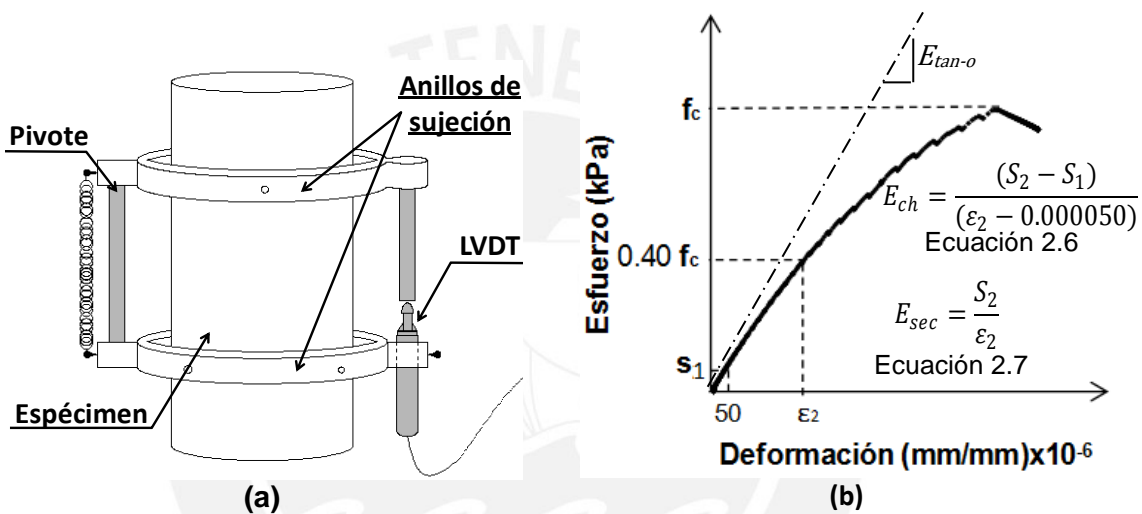
b. Aplicaciones del método

Los resultados obtenidos en este ensayo son utilizados para realizar el control de calidad del concreto y su aceptación obra. Este parámetro también es ampliamente utilizado para la verificación de resistencia especificada en el expediente técnico de un proyecto: resistencia a los 28 días (f'_c).

Se debe tener cuidado al momento de interpretar los resultados obtenidos en este ensayo porque los valores obtenidos dependerán de la geometría del espécimen, mezclado, vaciado, procedimiento constructivo, edad, temperatura y las condiciones de humedad durante el curado.

2.2.5 Método estándar para calcular el Módulo de Elasticidad Estático y el Módulo de Poisson del concreto en Compresión (ASTM C469, 2010).

Este ensayo permite obtener una relación entre el esfuerzo y la deformación, así como una relación entre la deformación longitudinal y transversal de un espécimen de concreto. En este ensayo, mientras se aplica una carga de compresión axial, se mide la deformación local del espécimen haciendo uso de deformímetros orientados en las dos direcciones principales de la probeta. La Figura 2.5, muestra la configuración del ensayo, así como la curva típica de esfuerzo - deformación.



dónde:

- E_{sec} = Módulo de elasticidad secante
- E_{ch} = Módulo de elasticidad de cuerda
- E_{tan-o} = Módulo de elasticidad tangente inicial
- S_2 = esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga última
- S_1 = esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas
- ϵ_2 = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S₂

Figura 2.5. Ensayo para obtener el módulo de elasticidad secante ASTM C469, se muestra (a) el esquema conceptual del ensayo, y (b) la curva esfuerzo-deformación.

a. Espécimen, equipos y procedimiento de ensayo.

Las probetas requeridas para este ensayo deben tener las mismas consideraciones y tolerancias que las estipuladas en ASTM C39 (ASTM, 2012) descrita previamente.

La máquina que aplicará la carga debe ser capaz de imponer una fuerza a una velocidad y magnitud especificadas. Así mismo debe tener las mismas consideraciones especificados en la ASTM C39 (ASTM, 2012).

Para determinar la deformación axial en la parte central de la probeta (donde los efectos de borde ya no tienen incidencia) se podrá hacer uso de un transductor diferencial de variación lineal (LVDT). En la sección diametralmente opuesta, se colocará un pivote. Durante la aplicación de la carga, la longitud del pivote permanecerá constante, mientras que el LVDT irá registrando la deformación externa del espécimen. Se asume que la deformación correspondiente al espécimen es aproximadamente la mitad de la registrada por el LVDT.

La longitud efectiva del LVDT no deberá de ser menor a 3 veces el tamaño máximo del agregado, ni mayor a dos tercios de la altura del espécimen. En caso de que el coeficiente de Poisson sea requerido, se necesitará de un extensómetro adicional, el cual deberá medir las deformaciones transversales. La precisión del LVDT debe ser de al menos 0.5 millonésimas.

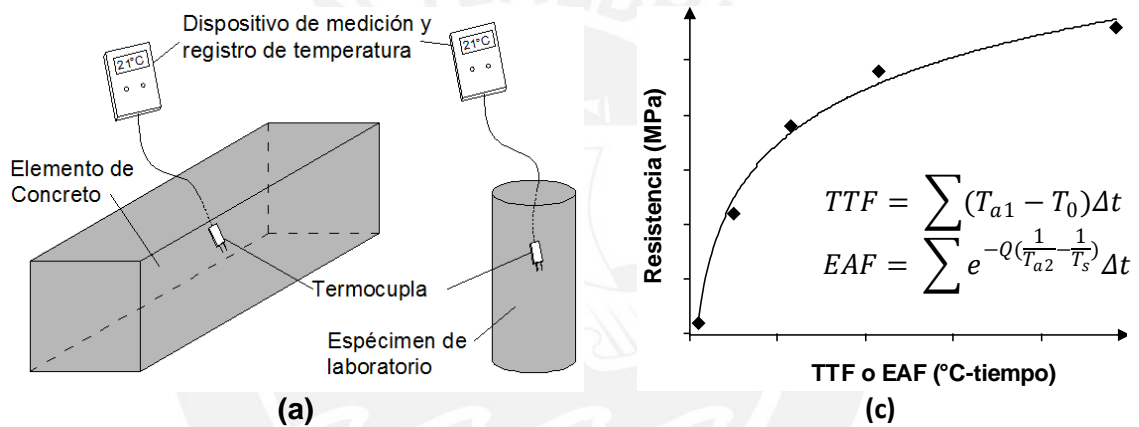
Durante la realización del ensayo, se procurará mantener constante la humedad natural como la temperatura del espécimen. A continuación, se acoplará el marco de medición al espécimen que se desea ensayar, hecho esto se colocará el espécimen en la máquina de carga y se asegurará que los ejes de carga coincidan con el centro del espécimen para evitar excentricidades. Una vez que fijado el espécimen, se realizará una pre-carga preliminar a fin de que la probeta se asiente en los apoyos y que los deformímetros den lecturas consistentes. Finalmente, se aplicará la carga de forma continua. Los bloques de carga tendrán una velocidad aproximada de 1 mm/min, y el ratio de aplicación de carga debe ser constante a una velocidad menor a los 250 kPa/s.

b. Aplicaciones y limitaciones

Este método cubre la determinación del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson tanto para probetas cilíndricas, como para núcleos perforados con diamantina. Ambos valores son obtenidos cuando la resistencia a la compresión del concreto alcanza aproximadamente el 40% de su resistencia última. El módulo obtenido en este ensayo (E_{ch}) generalmente suele ser menor que el módulo E_{tan-o} y mayor al E_{sec} . En tanto, de acuerdo a Lee et al. (1997) el módulo E_{tan-o} es similar al módulo de elasticidad dinámico del concreto (E_d).

2.2.6 Método estándar para estimar la resistencia del concreto utilizando el método de madurez (ASTM C1074, 2011).

Es una técnica para estimar la resistencia del concreto basado en la suposición de que las muestras de una mezcla alcanzan valores de resistencia iguales siempre y cuando tengan el mismo *índice de madurez*. El índice de madurez es un indicador de la madurez del concreto y puede ser calculado del historial de temperatura de una mezcla, haciendo uso de una expresión matemática denominada función de madurez ($M(t)$). Tal como se muestra en la Figura 2.6, la función de madurez puede ser expresada en términos del factor temperatura-tiempo (TTF), o en términos de edad equivalente a una temperatura específica (EAF).



dónde:

- TTF = el factor temperatura-tiempo a la edad t , en grados-días o grados-horas;
- Δt = un intervalo de tiempo específico, en días u horas;
- T_{a1} = temperatura promedio del concreto en el intervalo Δt , en grados;
- T_0 = dato de temperatura, en grados
- EAF = edad equivalente a una temperatura específica, en días u horas;
- Q = energía de activación dividida entre la constante de gas^{iv}, en grados Kelvin;
- T_{a2} = temperatura promedio del concreto en el intervalo Δt , en grados Kelvin; y
- T_s = temperatura específica, en grados Kelvin

Figura 2.6. Método de Madurez para obtener la resistencia del concreto; se muestra (a) el esquema del ensayo y (b) la relación resistencia madurez.

a. Espécimen, equipos y procedimiento de ensayo.

En campo los especímenes podrán, tener la forma adquirida debido al encofrado o lo requerido en el proyecto. En tanto, se recomienda que las probetas de laboratorio estén acorde a la norma ASTM C192 (ASTM, 2015).

^{iv} El valor de Q suele depender del tipo de cemento y el ratio agua cemento, para más información ver el Apéndice X1 de la norma ASTM C1074.

Básicamente se requiere de un equipo capaz de medir, registrar y almacenar la temperatura del concreto en función del tiempo. El equipo de medición estará acoplado a un sensor de temperatura denominado termocupla. En caso el equipo realice lecturas puntuales, estas deben realizarse cada 30 minutos durante la primeras 48 horas, y cada hora después de las 48 horas. La precisión del equipo debe ser de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Primero se desarrollará la relación resistencia-madurez en probetas de laboratorio obtenidas de la mezcla de concreto a analizar. Se recomienda que los valores de resistencia sean obtenidos en las siguientes edades: 1, 3, 7, 14 y 28 días acorde a ASTM C39 (ASTM, 2012). Finalmente se graficará una curva en donde el eje horizontal se encontrará el índice de madurez (*TTF* o *EAF*) y el eje vertical estará expresará la resistencia a la compresión.

El historial de temperatura en obra del concreto, del cual se quiere estimar la resistencia, es registrado desde el vaciado hasta la edad en que se requiere estimar la resistencia. El registro de la temperatura es usado para calcular el índice de madurez del concreto puesto en obra.

Por último, haciendo uso del índice de madurez calculado en obra y la relación resistencia-madurez, la resistencia del concreto puesto en obra puede ser estimada.

b. Aplicaciones y limitaciones

Este método puede ser utilizado para estimar la resistencia del concreto in-situ, y su resultado puede dar paso al inicio de actividades durante la construcción de un proyecto como: el retiro de los encofrados, post-tensado, y la apertura al tráfico en caso se trate de un pavimento rígido (Tikalsky et al, 2001).

Las mayores limitaciones que presenta el método de madurez son: el concreto debe permanecer en condiciones que permitan la hidratación total del cemento. Este método no toma en cuenta el efecto de la temperatura del concreto a edades tempranas en la resistencia a largo plazo. Finalmente, este método necesita que sus resultados sean complementados por otros indicadores de la potencial resistencia de la mezcla.

2.3 Métodos de carácter No Destructivo (MND) para la caracterización mecánica del concreto

El comité del 228 ACI (2004), elaboró un listado de los MND más utilizados que se pueden aplicar en estructuras de concreto y los dividió en 8 grupos, ver Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Métodos no destructivos para la caracterización mecánica del concreto

Método	Aplicación
1. Inspección Visual	Mapeo de anomalías como grietas, astillamiento, erosión o defectos de construcción
2. Métodos de ondas para estructuras	
Velocidad de Pulso Ultrasonico	Determinar la condición relativa del concreto basado en la velocidad del pulso
Eco Ultrasonico	Localización de vacios y de elementos relativamente angostos
Eco Impacto	Localización de huecos, cangrejas y medición de espesor de un elemento de concreto
Métodos de resonancia	Determinan forma y la frecuencia en que vibra de un elemento de concreto
Análisis espectral de ondas superficiales	Determinar el perfil de rigidez de un pavimento. Determina la profundidad del concreto deteriorado
3. Métodos de ondas para cimentaciones profundas	
Eco Sónico	Determinar la profundidad de fundaciones profundas como pilotes o pilas.
Impulse Response	Determinar la profundidad de fundaciones profundas como pilotes o pilas.
Registro de impedancia	Determinación aproximada de la forma de una cimentación
Ensayo sísmico paralelo	Determina la profundidad de la cimentación y si el concreto es uniforme o no.
4. Métodos nucleares	
Radiometría (transmisión directa)	Determina la densidad in-situ del concreto fresco o duro, también localiza la ubicación de los refuerzos de acero
Radiometría (retrodispersión)	Determina la densidad in-situ del concreto fresco o duro.
Radiografía	Localización del refuerzo, tuberías, vacios, y cangrejas
Ensayo de rayos gamma	Localiza regiones de baja densidad a lo largo de la cimentación
5. Métodos eléctricos y magnéticos	
Covermeter	Localización del refuerzo, la profundidad del recubrimiento, y estimado el diámetro del refuerzo
Potencial de celda media (medición de Δ voltaje)	Localiza la regiones con presencias de corrosión en el refuerzo
Métodos de polarización	Determinación instantánea del grado de corrosión del un refuerzo
6. Penetrabilidad	Permiten comparar la fluidez de diferentes mezclas de concreto
7. Termografía infrarroja	Localización de delaminaciones en pavimentos.
8. Radar	Localiza metales embebidos, vacios, regiones de alta humedad.

Esta investigación se enfocó en los *MND* de ondas para estructuras, los cuales a su vez se pueden dividir en métodos de resonancia y métodos basados en ondas. En los métodos de resonancia normalmente se registra la forma de vibración del espécimen, como una señal con dominio en el tiempo y haciendo uso de un arreglo, se transforma la señal inicial a una señal con dominio en la frecuencia. En cambio, en los métodos basados en ondas, se mide la amplitud, la velocidad, y la forma en que viajan las ondas. La Tabla 2.3, muestra con más detalle cada método y cuál es el parámetro obtenido después de realizar el ensayo.

Tabla 2.3. Métodos no destructivos utilizados para la caracterización mecánica del concreto.

MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS					
Tipo	Basados en:	Ensayo	Se registra:	Se mide:	Se obtiene:
Métodos de Resonancia	Señales con dominio en la frecuencia	Vibración Forzada ASTM C215	Vibración Longitudinal Dominio en el tiempo	f longitudinal	E_d
			Vibración Flexural Dominio en el tiempo	f flexural	E_d
			Vibración Torsional Dominio en el tiempo	f torsional	G_d
		Vibración Ambiental EMM-ARM	Vibración Flexural Dominio en el tiempo	f flexural	E_{AMR}
Métodos basados en ondas	Ondas Ultrasonicas	UPV ASTM C597	P -waves	$V_{P-waves}$	E_d
			P -waves	$V_{P-waves}$	E_d
		Bender Elements	S -waves	$V_{S-waves}$	G_d
				v	
	Ondas Electro-magnéticas	GPR	EM-waves	$V_{EM-waves}$	ϵ'
			Amplitud $EM-waves$	EWL	

dónde:

f = Frecuencia de vibración fundamental o de resonancia.

P -waves = Ondas ultrasónicas de tensión/compresión longitudinal.

S -waves = Ondas ultrasónicas de corte.

EM-waves = Ondas electromagnéticas.

V = Velocidad de onda.

E_d = Módulo de elasticidad dinámico del concreto.

G_d = Módulo de rigidez dinámico del concreto.

E_{AMR} = Módulo de elasticidad del concreto obtenido de respuestas ambientales.

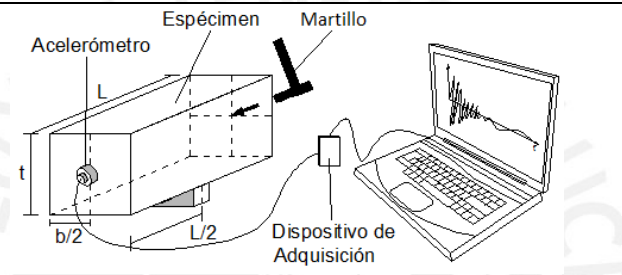
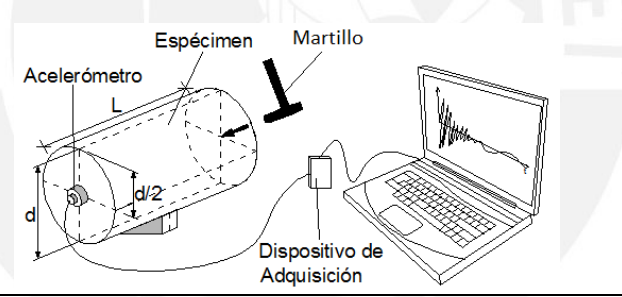
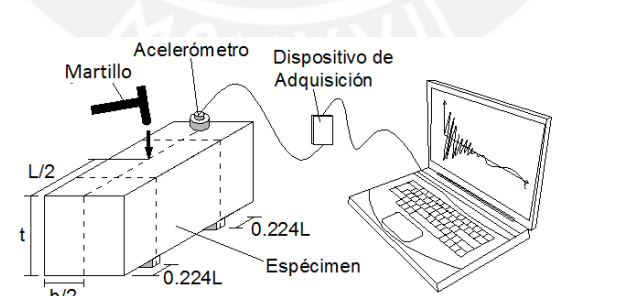
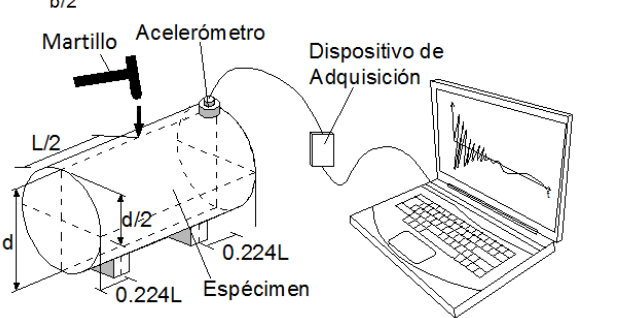
ϵ' = permisividad dieléctrica del concreto.

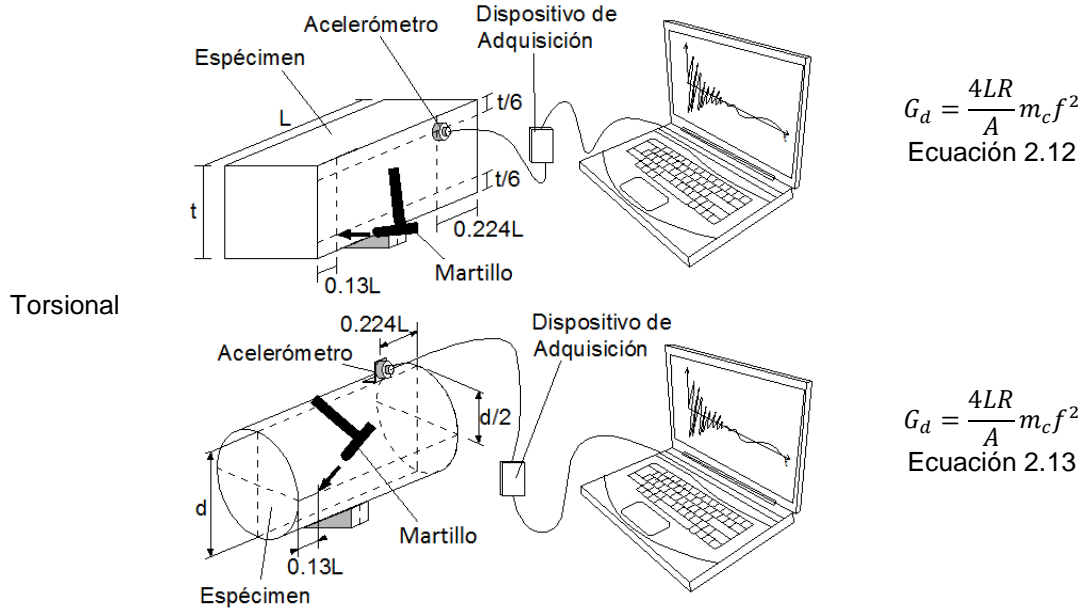
EWL = Nivel de energía de onda del concreto.

2.3.1 Método estándar para obtener la frecuencia de resonancia longitudinal, transversal, y torsional en especímenes de concreto (ASTM C215, 2008).

Los ensayos de resonancia por impacto descritos en esta norma, consisten en la estimación de frecuencias de resonancia en prismas o cilindros de concreto de los modos: longitudinal, transversal y torsional. Este método permite hallar el módulo de elasticidad dinámico (E_d) y el módulo de rigidez dinámico (G_d). La Tabla 2.4 muestra el esquema del ensayo para probetas cilíndricas y prismáticas.

Tabla 2.4. Esquema del método de resonancia por impacto.

Modo de vibración	Esquema del ensayo	Ecuaciones
Longitudinal	 	$E_d = \frac{4L}{bt} m_c f^2$ <p>Ecuación 2.8</p> $E_d = \frac{5.093L}{d^2} m_c f^2$ <p>Ecuación 2.9</p>
Flexión	 	$E_d = \frac{0.946L^3 T}{bt^3} m_c f^2$ <p>Ecuación 2.10</p> $E_d = \frac{1.607L^3 T}{d^4} m_c f^2$ <p>Ecuación 2.11</p>



dónde:

- L = es la longitud del espécimen,
- b = ancho del espécimen,
- t = peralte del espécimen,
- m_c = la masa del espécimen,
- f = la frecuencia de vibración fundamental,
- d = el diámetro de la probeta,
- R = radio de giro de la sección transversal de la probeta,
- T = factor de corrección que depende del radio de giro,
- A = es el área de la sección transversal de la probeta
- E_d = módulo de elasticidad dinámico obtenido en función a la frecuencia de resonancia,
- G_d = módulo de rigidez dinámico

a. Especímen, equipos y procedimiento.

Los especímenes deberán seguir los procedimientos de mezclado y curado de acuerdo a ASTM C31 (ASTM, 2015) en caso se realicen en campo, para especímenes de laboratorio estos deberán estar acorde a ASTM C192 (ASTM, 2014). Para núcleos perforados, la norma utilizada para el ensayo será ASTM C42 (ASTM, 2013). Los elementos de concreto que se ensayen bajo esta metodología podrán tener formas prismáticas o cilíndricas siempre y cuando el ratio largo-longitud transversal máxima, se encuentre entre 2 y 5.

El espécimen se colocará sobre un apoyo que le permita vibrar libremente. Dependiendo del modo de vibración a analizar, podrá haber uno o dos puntos de

contacto entre el espécimen y el apoyo. Para excitar la probeta en cualquier de sus modos de vibración se hará uso de un martillo. Este dispositivo podrá estar hecho de metal o de plástico rígido, y debe ser capaz de producir un impacto capaz de excitar a la probeta en un tiempo corto.

El elemento que medirá el movimiento del espécimen consistirá en un acelerómetro piezoeléctrico y tendrá una frecuencia operativa que oscile al menos entre 100 Hz y 10000 Hz. Este acelerómetro registrará las señales de movimiento de forma análoga.

Finalmente se requiere de un dispositivo de adquisición de datos (DAQ), el cual debe ser capaz de registrar la data del acelerómetro y convertirla en señales digitales que puedan ser analizadas y almacenadas en un computador. Este equipo deberá complementarse con un software que permita ajustar la frecuencia de muestro.

En general el procedimiento para obtener las 3 frecuencias fundamentales se puede describir de la siguiente manera:

- Colocar el espécimen en el apoyo.
- Acoplar el acelerómetro: se puede hacer uso de una cera o un pegamento para fijar el instrumento a la probeta de concreto.
- En el programa de adquisición de datos se ajustará la frecuencia y el rango de muestro. La frecuencia de muestro debe ser de al menos dos veces la frecuencia esperada de resonancia de la probeta.
- Haciendo uso del martillo se realizará un golpe que excite la probeta. El lugar y dirección del golpe dependerán de qué forma de vibración se desea analizar.
- Finalmente se deberá registrar y repetir el ensayo al menos dos veces hasta que la variación sea menor al 10%.

En Haach et al (2013) se propone una correlación entre el módulo de elasticidad estático (E_{ch}) y el E_d de morteros, cuya resistencia a la compresión (f_c) se encontraba en el rango de 2.5 y 20 MPa. Esta investigación también propone una relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión, las relaciones son presentadas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Ecuaciones propuestas por Haach et al. (2013) que correlacionan el E_d con el E_{ch} y la resistencia a la compresión (f_c).

Modo de vibración	Ecuación	
Flexión	$E_d = 1.391E_{ch}$	Ecuación 2.14
Longitudinal	$E_d = 1.318E_{ch}$	Ecuación 2.15
Flexión	$E_d = 4.05(f_c)^{2/3}$	Ecuación 2.16
Longitudinal	$E_d = 3.76(f_c)^{2/3}$	Ecuación 2.17

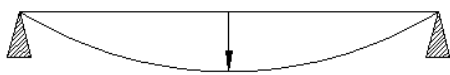
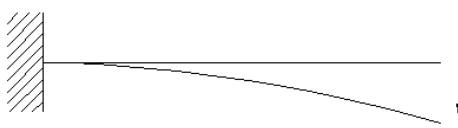
b. Aplicaciones y limitaciones

Este ensayo es útil para determinar los cambios significativos en la frecuencia de vibración fundamental en el tiempo de las muestras de concreto. Por tanto su principal empleo consiste en monitorear el desarrollo del E_d con respecto a la edad de las muestras. Es importante notar que con este método se puede tener estimaciones de la evolución del concreto desde edades tempranas, inmediatamente después del desencofrado. Se debe tener en cuenta que el valor obtenido en este ensayo suele ser significativamente mayor que el módulo E_{ch} (ASTM C469, 2010).

2.3.2 EMM-ARM: Método para medir el Módulo de Elasticidad basado en Respuestas Ambientales (Azenha et al, 2010).

Este método fue propuesto en Azenha et al. (2010). El método EMM-ARM es una técnica que permite evaluar de forma continua el incremento y desarrollo del módulo de elasticidad del concreto en el tiempo, desde el momento del vaciado. Este método utiliza el registro de las vibraciones del espécimen producidas por su entorno natural, para la obtención de la frecuencia de resonancia. La evolución del módulo de elasticidad se obtiene en función de la masa, la geometría y la frecuencia de resonancia del espécimen. Dependiendo de las condiciones de borde del espécimen a analizar, se puede deducir una ecuación específica que relacione el módulo de elasticidad con los parámetros antes mencionados, tal como se muestra en la Tabla 2.6. Es importante señalar que este método también permite evaluar la influencia del curado en la rigidez y la resistencia del espécimen.

Tabla 2.6. Relación entre la geometría, la masa, la frecuencia de resonancia y el módulo de elasticidad, en función a las condiciones de borde del espécimen.

Condición de borde	Ecuación
<p>a. Simplemente apoyada</p> 	$EI = \left(f \frac{2L^2}{\pi} \right)^2 m_1$ <p>Ecuación 2.18</p>
<p>b. Empotrado en uno de sus extremos</p> 	$a^3(\cosh(aL) \cos(aL) - 1) + \frac{\omega^2 m_1}{EI}(\cos(aL) \sinh(aL) - \cosh(aL) \sin(aL)) = 0$ <p>Ecuación 2.19</p>

dónde:

$$a = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 m_1}{EI}} \omega = 2\pi f$$

EI = rigidez del sistema concreto-encofrado, y
 m_1 = la masa distribuida uniforme.

Para eliminar la incidencia del encofrado en la obtención del módulo de elasticidad se hará uso de la Ecuación 2.20, donde E_{ARM} es el módulo de elasticidad del concreto; E_e , el módulo de elasticidad del encofrado; I_e , la inercia del encofrado; y finalmente, I_{ARM} es la inercia del espécimen de concreto. El esquema para las dos condiciones de borde se ve en la Figura 2.7.

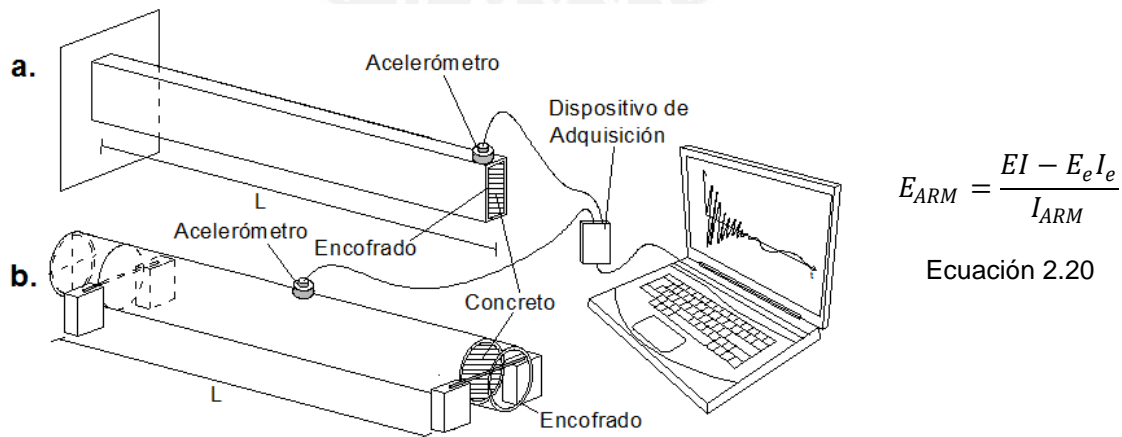


Figura 2.7. Esquema del método EMM-ARM para la obtención del módulo de elasticidad del concreto: (a) empotrada en uno de sus extremos y (b) simplemente apoyada

a. Espécimen, equipos y procedimiento

El espécimen a evaluar tiene restricciones en cuanto a su geometría: el largo del espécimen debe ser considerablemente mayor al diámetro o base de su sección transversal, a fin de favorecer la vibración libre del espécimen. En tanto, el encofrado deberá estar compuesto por un material homogéneo que posea una masa uniformemente distribuida.

Para el registro del movimiento en el tiempo del espécimen se hará uso de un acelerómetro piezoeléctrico, similar al utilizado en el ensayo de vibración forzada y capaz de medir los movimientos generados de forma natural en la espécimen. Para el registro de los datos entregados por el acelerómetro se hará uso de un *DAQ*.

De forma similar al ensayo de vibración forzada, se requerirá de un software que adquiera los datos recopilados por el acelerómetro. Este software además debe registrar periódicamente el modo de vibración de la probeta.

Este método consiste en vaciar una mezcla de concreto en un molde específico, y haciendo uso de un acelerómetro, la variación de la frecuencia de resonancia es obtenida continuamente de los registros de aceleración del espécimen. Conforme transcurra el tiempo, se tendrá un incremento de la frecuencia de resonancia, la resistencia y el valor del módulo E_{AM} . La Figura 2.8 muestra el registro de cuatro frecuencias obtenidas de un mismo espécimen a diferentes edades.

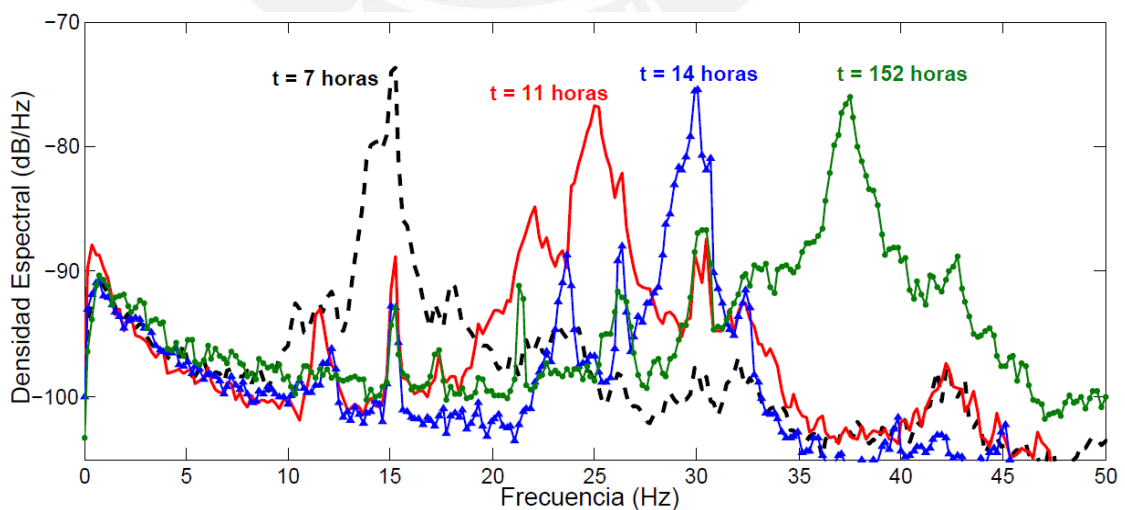


Figura 2.8. Crecimiento de Frecuencia de vibración fundamental en el tiempo.

Los pasos previos incluyen la preparación de la mezcla, la adecuación del encofrado, el vaciado, compactado y vibrado del concreto fresco. A continuación, se deberá adecuar el espécimen de acuerdo a las condiciones de borde y se colocará el acelerómetro en la probeta.

Tanto pronto como sea posible, se deberá dar inicio al registro de las vibraciones ambientales que se generen en el espécimen. Haciendo uso de un software, se deberá programar el tamaño de los intervalos y su duración, con el propósito de obtener mediciones continuas a lo largo de la vida útil de la probeta; además se deberá fijar la frecuencia de muestreo. En Azenha et al. (2010), se registraron y analizaron periodos de 15 minutos de duración con una frecuencia de muestreo de 100 Hz.

Para el análisis de cada medición registrada, se deberá convertir las señales con dominio en el tiempo, en señales de dominio de la frecuencia. Métodos como la Transformada de Fourier (Cooley y Tukey, 1965) o el método de densidad espectral Welch (Welch, 1967), son válidos.

Finalmente la frecuencia de resonancia se puede obtener utilizando métodos de identificación modal como el método de selección de picos o el método de sub-espacios escolásticos SSI (Aguilar, 2010).

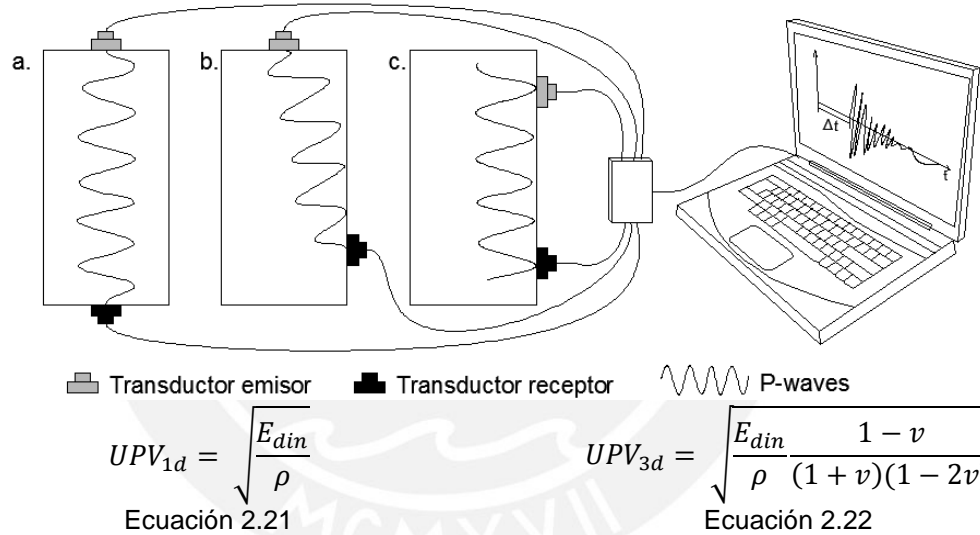
b. Aplicaciones y limitaciones

En el método original (Azenha, 2010) se utilizó un acrílico como encofrado, sin embargo este método fue mejorado en Azenha (2012), en donde se utilizó un perfil de acero tipo U el cual representa mejor las condiciones de obra. Es importante señalar que la adquisición de los datos y el cálculo de la frecuencia de resonancia se pueden realizar de forma automática. No es necesario forzar la excitación de la probeta debido a que esta se generara a través de respuestas ambientales.

La principal limitación de este método es conseguir que el ensayo cumpla con las condiciones de borde planteadas teóricamente, y que el espécimen y el encofrado estén compuestos por materiales isotrópicos, además es importante contar con adecuado compactado y vibrado durante la fabricación.

2.3.3 Método estándar para la velocidad de pulso a través del concreto (ASTM C59, 2009).

Este método emplea ecuaciones teóricas que relacionan la velocidad de propagación de ondas de tensión longitudinal (*P-wave*) con el módulo de elasticidad E_d . Las ondas *P-wave* son generadas por un transductor electro acústico pegado a una de las superficies del espécimen, una vez que las ondas atraviesan la longitud de la probeta (L_1), un segundo transductor las recibe y las convierte en energía eléctrica. El tiempo en que la onda *P-wave* demora en llegar de un transductor a otro (Δt) se mide electrónicamente. La velocidad de pulso ultrasónico (*UPV*) se define como el cociente entre L_1 y Δt . La Figura 2.9 muestra el esquema del ensayo y tres formas de realizar la transmisión de ondas.



dónde:

UPV_{1d} = velocidad de pulso unidimensional,
 UPV_{3d} = velocidad de pulso tridimensional, y
 ρ = Densidad del espécimen.
 v = módulo de Poisson.

Figura 2.9. Métodos para obtener la *UPV*: (a) transmisión directa, (b) transmisión semidirecta y (c) transmisión indirecta.

a. Especímen, equipos y procedimiento.

Este ensayo se puede aplicar en campo o laboratorio y los especímenes pueden ser las probetas típicas de 4"x8" o 6"x12", o elementos estructurales como columnas y vigas.

Los equipos requeridos consisten en dos transductores electro-acústicos (uno emisor y un receptor de *P-waves*), un amplificador de frecuencias o un *DAQ* y un computador para el análisis y cálculo de la *UPV*. También se contará con un calibrador, elemento rígido cuya *UPV* es conocida; y un agente que adhiera los transductores al espécimen.

El procedimiento se puede resumir de la siguiente manera:

- Se definirá los puntos del elemento estructural que se desea analizar, se recomienda realizar la mayor cantidad de pruebas posibles con la finalidad de obtener un resultado representativo.
- Dependiendo de la accesibilidad de la zona a evaluar se procederá a elegir el tipo de transmisión a realizar. Cabe señalar que la medición directa es el método más preciso. La transmisión indirecta no da resultados representativos ya que las *P-waves* viajan pegadas a una de las superficies del espécimen.
- Elegidos los puntos de emisión y recepción, se deberá asegurar que estos se encuentren libres de fisuras, polvo o rugosidades que podrían inducir en la generación de señales defectuosas.
- Antes de adherir los transductores, estos deberán ser calibrados con ayuda del elemento rígido. A continuación se acoplará los transductores al espécimen y se determinará el tiempo cero electrónicamente: momento en que el transductor emisor empieza a generar los pulsos.
- Finalmente se procederá a determinar el tiempo de tránsito restando el tiempo cero del tiempo en que el transductor receptor recibe la señal de onda.

b. Aplicaciones y limitaciones

La Ecuación 2.21 se puede utilizar cuando el elemento a ensayar tenga una dimensión significativamente mayor que las otras dos, una barra por ejemplo. En tanto, con la Ecuación 2.22 se tendrán mejores resultados para cualquier otro tipo de elementos.

La precisión de este método dependerá mucho de la habilidad del operador para determinar el tiempo preciso en que las ondas se transmiten. La identificación de la llegada de la *P-wave* al transductor receptor, algunas veces puede ser muy subjetiva, por lo que los ensayo se deben repetir varias veces. En especímenes muy largos, los pulsos generados tienden a disiparse rápidamente debido a las bajas amplitudes en que se realiza el ensayo.

2.3.4 *Bender Elements (BE)* para la caracterización mecánica el concreto, Zhu y Kee (2010)

De forma similar a los transductores electro-acústicos, los *BE* tienen la capacidad de medir ondas de ultrasonido. Sin embargo, los *BE* tienen la ventaja de que no necesitan de un elemento adicional en otra cara del espécimen, por lo que se acomodan mejor a las condiciones de obra. Además, los *BE* son capaces de medir tanto ondas longitudinales (*P-waves*) como ondas de corte (*S-waves*).

Originalmente, los *BE* fueron utilizados para medir la velocidad de onda de corte (*S-waves*) de sedimentos marinos: Shirley y Hampton (1978). Gracias a su portabilidad, tamaño, y a que trabajan adecuadamente en materiales de baja impedancia acústica (resistencia impuesta por un medio a la propagación de ondas acústicas); este método fue rápidamente replicado en la mecánica de suelos.

La Figura 2.10 muestra un esquema del mecanismo de funcionamiento de los *BE*. Cada *BE* está compuesto por dos láminas piezo-cerámicas adheridas a un elemento metálico muy delgado. El movimiento continuo se da cuando se aplica un diferencial de voltaje (ΔV) mediante un circuito que puede ser en serie o en paralelo. El ΔV generará una polarización diferente para cada una de las láminas de modo que se generaron fuerzas magnéticas, las cuales obligan a las láminas a cambiar de un estado de expansión a un estado de contracción constantemente.

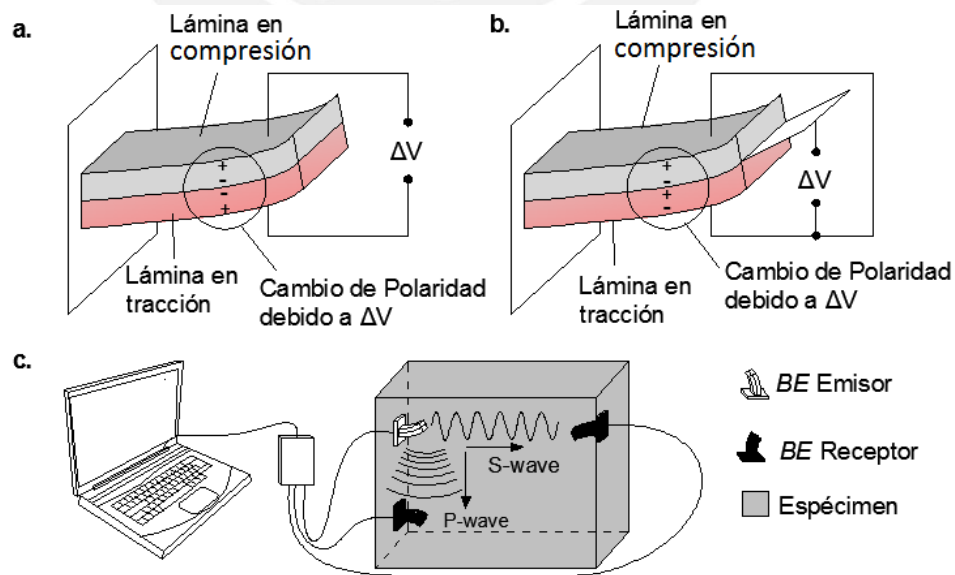


Figura 2.10. Mecanismo de funcionamiento de un *BE* conectado (a) en serie y en (b) paralelo. (c) Esquema conceptual del ensayo. (Adaptado de Zhu y Kee, 2010)

Las publicaciones más recientes de la aplicación de este método para la caracterización del concreto están relacionadas a sus propiedades físicas. J. Zhu y Kee (2010) utilizó BE para monitorear el desarrollo micro-estructural (hidratación y fragua) de una pasta de cemento, en función a la velocidad de *P-waves* y *S-waves*.

La geometría de los especímenes no debería influir en la obtención de los resultados; sin embargo, se recomienda moderar su longitud para evitar la excesiva disipación de las ondas.

Para poder medir las *P-waves* o las *S-waves* que se propagan a través de un espécimen se requiere al menos de dos BE, un emisor y un receptor de señales. Se requerirá un DAQ para poder adquirir y registrar las señales provenientes de los BE y un software compatible que permita analizar y procesar los datos.

El procedimiento es similar que el ensayo de UPV, se debe fijar un tiempo cero en donde se empezarán a emitir las ondas del BE emisor. La velocidad de las *P-waves* (V_{P-wave}) y las *S-waves* (V_{S-wave}), se calcularán como el cociente entre la distancia que separa el BE emisor del BE receptor, entre el tiempo en las ondas demoren en llegar al BE receptor. Dado que los BE quedarán embebidos en el espécimen, se puede realizar un algoritmo que permita realizar este procedimiento de forma continua y automática. Al igual que el método EMM-ARM, con los BE, es posible evaluar el desarrollo y evaluación del concreto desde que este es vaciado.

Las *P-waves* generadas por este método pueden ser utilizadas para obtener E_d haciendo uso de la Ecuación 2.22, sin embargo primero se debería comprobar esta suposición en laboratorio haciendo ensayos UPV sobre el mismo espécimen. En tanto, las con las *S-waves* se puede calcular el valor de G_d haciendo uso de la Ecuación 2.23. El módulo de Poisson puede ser determinado haciendo uso de la Ecuación 2.24. Poco se investigado sobre la correlación entre las *S-waves* y las propiedades mecánicas del concreto en términos de resistencia a largo plazo.

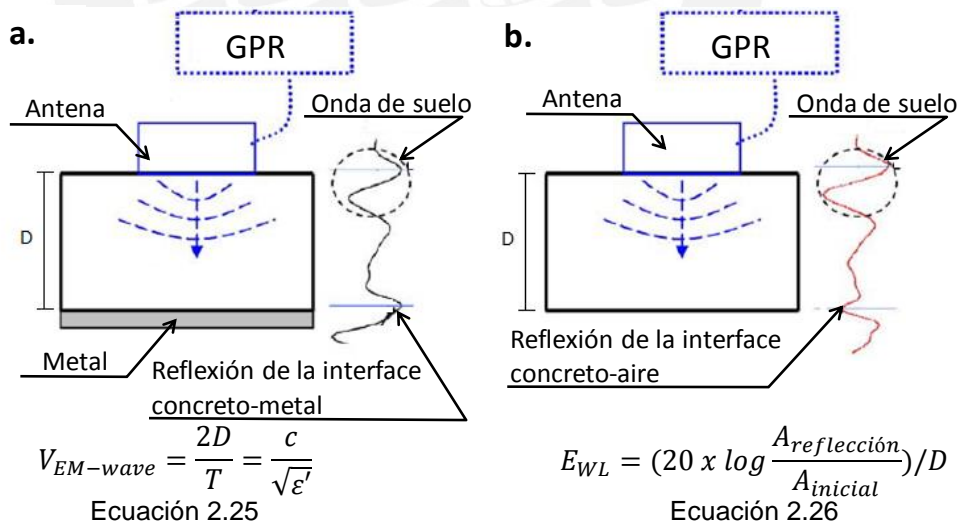
$$G_d = \rho (V_{S-wave})^2 \quad \text{Ecuación 2.23}$$

$$v = \frac{(V_{P-wave})^2 - 2(V_{S-wave})^2}{2((V_{P-wave})^2 - (V_{S-wave})^2)} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

2.3.5 Ondas Electromagnéticas para la caracterización mecánica del concreto

El georadar o *Ground Penetration Radar (GPR)*, es ampliamente utilizado para la caracterización física y mecánica de materiales sub-superficiales. Algunas de sus aplicaciones geotécnicas son: determinar la estratigrafía del suelo, ubicar la profundidad de la napa freática o del estrato resistente, o la identificación de cavidades o rupturas en estratos inferiores. Más recientemente, sus aplicaciones se vienen utilizando en la evaluación de proyectos de infraestructura como presas y puentes para la localización y detección de anomalías en el concreto o en el refuerzo, y en menor medida para la caracterización mecánica del concreto en términos de resistencia.

Este método se basa en que la velocidad y amplitud de las ondas electromagnéticas (EM_{-wave}), dependen de las propiedades di-eléctricas del material que atraviesan (permitividad dieléctrica, conductividad y permeabilidad magnética). En Lai et al. (2009) se establecen relaciones entre la permitividad dieléctrica real (ϵ'), el nivel de energía de onda (E_{WL}) y la resistencia a la compresión en concretos hechos con agregados normales y livianos (ver Tabla 2.7). La Figura 2.11 obtenida de Lai et al. (2009) muestra el esquema del ensayo junto con las ecuaciones de ϵ' y E_{WL} .



dónde:

D = espesor del espécimen en m.

T_i = tiempo de viaje de la onda electromagnética

c = velocidad de la luz en m/s.

$A_{reflección}$ = máxima amplitud de onda obtenida de la resta $EM_{-wave} - a$ menos $EM_{-wave} - b$.

$A_{inicial}$ = amplitud inicial registrada por el GPR, correspondiente al suelo.

Figura 2.11. Esquematación del ensayo para la obtención de las propiedades mediante un GPR: (a) cuando se coloca un metal en la base y (b) cuando el espécimen está en contacto con el suelo. (Lai et al, 2009)

Tabla 2.7. Relaciones entre f_c , y ε' ; y E_{WL} y f_c propuestas por Lay et al. (2009).

Relación entre f_c , y ε'			Relación entre E_{WL} y f_c			
$\varepsilon' = \alpha(f_c^{-\beta})$			$E_{WL} = \gamma \ln(f_c) - \phi$			
Ecuación 2.27			Ecuación 2.28			
Concreto	Peso Volumétrico	Ratio (a/c)	α	β	γ	ϕ
Liviano	1625 kg/m ³	0.35	20.5	0.1247	65.9	162.9
Liviano	1714 kg/m ³	0.38	22.5	0.1364	112.7	345
Liviano	1798 kg/m ³	0.34	24.7	0.1559	109.7	374
Liviano	1724 kg/m ³	0.32	31.6	0.2192	147	540.5
Liviano	1739 kg/m ³	0.28	33.6	0.2189	162.6	627.3
Normal	2289 kg/m ³	0.57	17.9	0.1074	34.6	75
Normal	N/A	0.51	16	0.0907	12.8	5.1
Normal	2298 kg/m ³	0.48	13.6	0.0646	12.3	2.8

El *GPR* se viene utilizando recientemente para la caracterización mecánica del concreto; por ende, aún no existe restricciones o especificaciones sobre las dimensiones que debe cumplir el espécimen. Lai et al. (2009) utilizó probetas cúbicas de 100 mm de lado, y "losas" de 200 mm x 200 mm x 150 mm. El *GPR* utilizado, consistía de un radar mono-estático equipado con una antena de un 1GHz de capacidad.

El procedimiento es sencillo, se debe acoplar la antena del georadar sobre el concreto. Seguidamente se empezarán a emitir las *EM-wave*. Para la obtención de T_i se registrará el tiempo en que la onda tarda en ir hasta la base del espécimen y volver a la antena. Además, es importante registrar la forma de la *EM-wave*. Este procedimiento se realizara para los casos a y b; es decir, uno cuando haya un metal bajo el elemento de concreto y otro cuando este se encuentre apoyado directamente en el suelo.

Tal como se describe en la Ecuación 2.25, basta contar con los valores de D y T , para obtener ε' , ya que c es un parámetro conocido. Por otro lado; para la obtención de E_{WL} se requiere de pasos adicionales. Primero se deberá reconocer las reflexiones máximas negativas y positivas para el caso a y el caso b. Luego se procederá a restar estas reflexiones ($a - b$), finalmente se medirá el valor de $A_{reflección}$, el cual representa la primera amplitud positiva obtenida de la resta. $A_{inicial}$ corresponde a la máxima amplitud de suelo en donde se apoya el espécimen.

2.4 Conclusiones

En este capítulo se presentó un resumen de los métodos destructivos y no destructivos que permiten obtener las propiedades mecánicas del concreto. Se enfatizó en describir propiedades relacionadas a la resistencia y al módulo de elasticidad del concreto.

Los métodos destructivos descritos se basan en comportamientos a tracción, flexión y compresión. Sin embargo, se ha puesto especial atención a los ensayos destructivos relacionados con el comportamiento a compresión (resistencia y módulo de elasticidad) ya que son los más utilizados actualmente para caracterizar el concreto.

En cuanto a los ensayos no destructivos, se describieron los métodos más utilizados para caracterizar estructuras de concreto y se explicó brevemente los métodos de resonancia por impacto, los métodos basados en ondas ultrasónicas y métodos basados en ondas electro-magnéticas.



CAPÍTULO 3. Aplicación de ensayos de resonancia por impacto para la caracterización mecánica del concreto

3.1. Introducción

Esta sección tiene dos objetivos. El primero, es evaluar el desarrollo de la frecuencia longitudinal y el módulo elasticidad dinámico (E_d) en el tiempo, para lo cual se utilizaron 20 especímenes fabricados y curados en laboratorio. El segundo objetivo, es analizar la relación entre el E_d y la resistencia a la compresión f_c del concreto. Este propósito se llevó a cabo mediante el ensayo de más de 265 especímenes provenientes de diferentes obras de la ciudad de Lima en el laboratorio de estructuras de la PUCP. Para conseguir ambos objetivos se utilizó ensayos de resonancia por impacto complementados con ensayos de compresión simple que se realizaron según las normas ASTM C215 (ASTM, 2008) y ASTM C39 (ASTM, 2012), respectivamente.

3.2. Evaluación de la frecuencia de resonancia longitudinal y el módulo de elasticidad dinámico (E_d) en el tiempo.

3.2.1 Materiales y especímenes

En los 20 especímenes fabricados en laboratorio, se utilizó cemento Portland tipo I. El agregado grueso contaba con un tamaño máximo nominal de partícula de 19.05 mm, mientras que el agregado fino poseía un módulo de finura de 2.80. En tanto, las partículas pasantes a la malla #200 representaban menos del 5% del agregado global. La gradación de ambos agregados se muestra en la Figura 3.1.

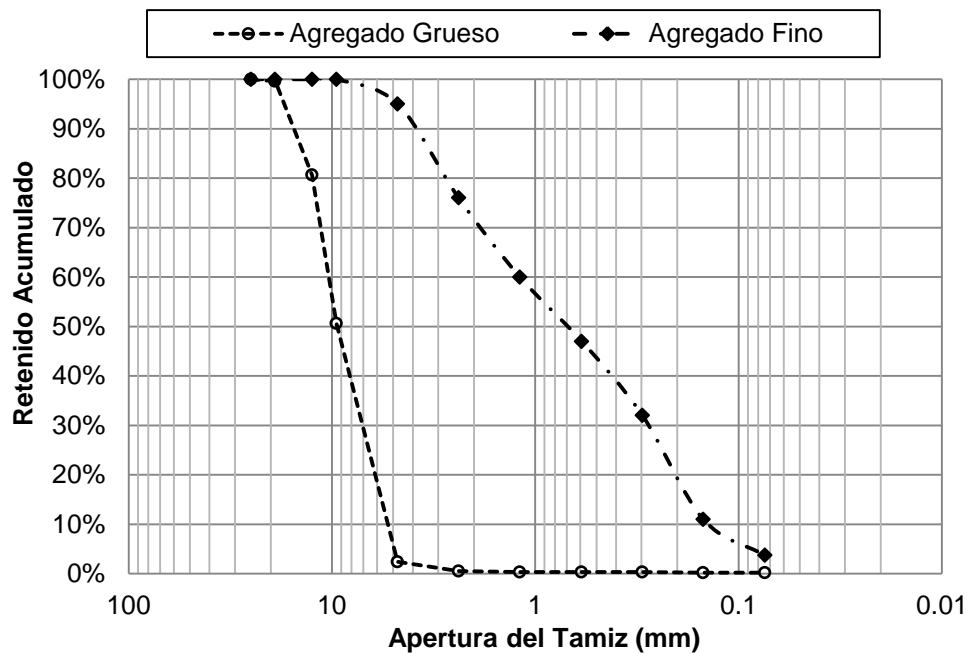


Figura 3.1. Análisis granulométrico de los agregados.

Con la finalidad de representar a un concreto convencional, se utilizó un diseño de mezcla con una relación agua/cemento (A/C) igual a 0.54 y una resistencia los 28 f'c de 27.5 MPa. Las probetas cilíndricas, fabricadas y curadas en laboratorio bajo la norma ASTM C192 (2012), tenían la dimensión de 0.15 m x 0.30 m. La densidad del concreto y contenido de aire fueron obtenidos de acuerdo a las normas ASTM C138 (2009) y ASTM C231 (2014) respectivamente. La dosificación para un metro cúbico junto con las propiedades del concreto en estado fresco, se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición de la mezcla y propiedades físicas

Relación A/C	A/C	0.54	
Dosificación (Kg)	Cemento Portland tipo I	370	15%
	Agua	200	8%
	Agregado Fino	902	38%
	Agregado Grueso	922	39%
Propiedades en estado fresco	Densidad (Kg/m ³)	2435	
	Contenido de Aire (%)	1.6	
	Temperatura (°C)	19.0	
	Slump (cm)	7.5	

En la Figura 3.2 se muestran fotos del proceso de fabricación de las probetas controladas en laboratorio.



Figura 3.2. Preparación de la mezcla: (a) dosificación en peso; (b) mezclado; y (c) vaciado, vibrado y compactado de los especímenes.

La edad de rotura de los especímenes controlados en laboratorio, sus propiedades geométricas y su masa, son mostradas en la Tabla 3.2. Es importante señalar que los especímenes se curaron en una cámara de humedad controlada.

Tabla 3.2. Propiedades de los especímenes controlados en laboratorio: edad de rotura, longitud, diámetro y masa.

Nombre	Edad de Rotura (días)	L (m)	d (m)	Peso (Kg)
M1-1	2	0.301	0.1531	13.35
M1-2	2	0.302	0.1535	13.57
M1-3	4	0.300	0.1520	13.17
M1-4	4	0.303	0.1525	13.38
M1-5	11	0.309	0.1536	13.87
M1-6	11	0.303	0.1533	13.57
M1-7	14	0.305	0.1522	13.63
M1-8	14	0.304	0.1537	13.81
M1-9	28	0.302	0.1526	13.47
M1-10	28	0.300	0.1527	13.38
M2-1	2	0.300	0.1506	12.95
M2-2	2	0.304	0.1498	12.88
M2-3	4	0.300	0.1503	12.92
M2-4	4	0.306	0.1533	13.54
M2-5	11	0.301	0.1501	12.97
M2-6	11	0.301	0.1521	13.01
M2-7	14	0.302	0.1533	13.33
M2-8	14	0.305	0.1525	13.52
M2-9	28	0.302	0.1527	13.49
M2-10	28	0.305	0.1526	13.67

3.2.2 Ensayo de Resistencia a la compresión

El equipo utilizado para realizar este ensayo consistió de una máquina de carga fabricada por ELE International, con una capacidad máxima de carga de 1500 kN. Todos los ensayos se realizaron a una velocidad estándar de 300 KN/min hasta alcanzar la rotura. Para distribuir la carga de forma uniforme y reducir los efectos de los esfuerzos de fricción presentes en la interface espécimen/cabezal se hizo uso de cappings de neopreno.

La máxima fuerza aplicada (P) y el tipo de falla fueron registrados. El esquema teórico y el ensayo real se muestran en la Figura 3.3. Finalmente, haciendo uso de la carga P y las propiedades geométricas de cada espécimen, se utilizó la Ecuación 2.5 para obtener la resistencia a la compresión.

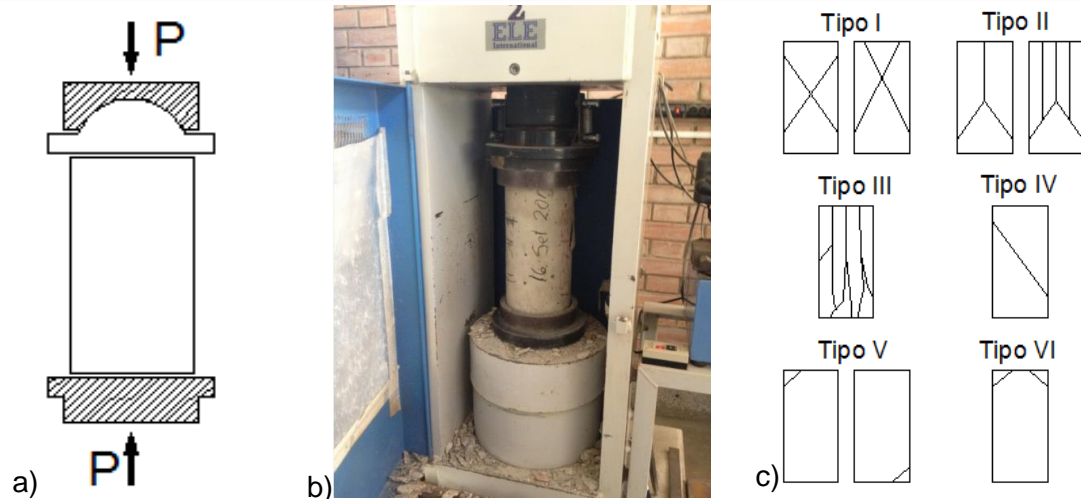


Figura 3.3. (a) Esquema teórico, (b) esquema real del ensayo de compresión simple y (c) tipo de falla del espécimen.

La Tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos de los ensayos de compresión, se registraron datos de carga máxima (P), resistencia a la compresión (f_c) y el tipo de falla.

Tabla 3.3. Resultados de resistencia a la compresión en probetas controladas en laboratorio.

Espécimen	Edad	Carga P (kN)	f_c (MPa)	Falla
M1-1	2	313.0	17.00	II
M1-2	2	298.6	16.15	II
M1-3	4	365.0	20.13	II
M1-4	4	398.8	21.83	III
M1-5	11	490.0	26.46	III
M1-6	11	477.3	25.88	II
M1-7	14	525.9	28.92	III
M1-8	14	540.7	29.16	III
M1-9	28	537.6	29.39	II
M1-10	28	570.0	31.12	II
M2-1	2	322.5	18.10	II
M2-2	2	318.4	18.08	II
M2-3	4	391.9	22.09	II
M2-4	4	416.4	22.57	II
M2-5	11	484.6	27.40	III
M2-6	11	515.7	28.40	I
M2-7	14	602.1	32.62	II
M2-8	14	568.0	31.10	III
M2-9	28	623.5	34.05	II
M2-10	28	656.5	35.90	II

3.2.3 Ensayo de resonancia por impacto

Este método fue aplicado en cada espécimen de forma diaria hasta el día del ensayo de rotura. Con la finalidad de obtener un valor estadísticamente válido, todos los días se realizaron tres ensayos en cada espécimen. Los siguientes equipos empleados fueron los siguientes:

- Un elemento de madera simple como apoyo.
- Un martillo metálico para excitar al espécimen.
- El acelerómetro usado en esta investigación fue fabricado por PCB Piezotronics, Modelo 352b cuya sensibilidad es de 963 m-Volts/g.
- Un material plástico adhesivo, que sirvió para mantener el acelerómetro pegado al espécimen.
- El equipo de adquisición de señales constó de un DAQ fabricado por National Instruments con 4 canales de entrada, modelo DAQ-NI 9234. Este dispositivo portátil es capaz de medir frecuencias de audio con una precisión adecuada, debido a su resolución de 24 bits.
- El software usado para importar y guardar las señales adquiridas se denomina UM-Acquisition 2008 V1 - LabView y fue elaborado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Minho – Portugal en R. Aguilar et al. (2008).

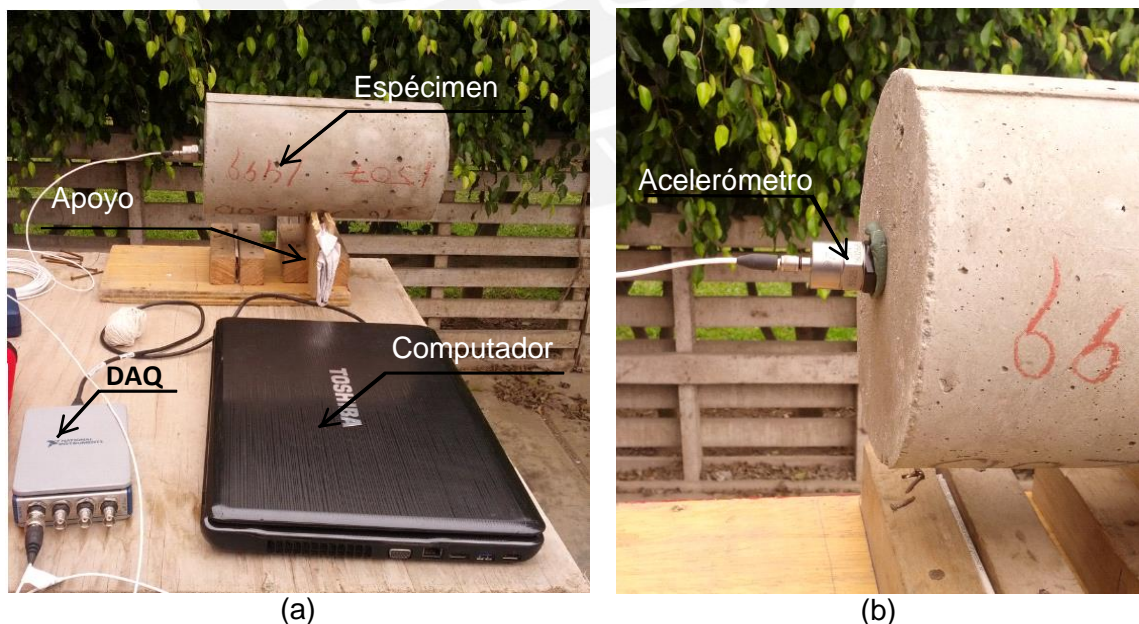


Figura 3.4. Equipos utilizados y configuración para el ensayo de vibración forzada:
(a) DAQ más apoyo y computador (b) acelerómetro y espécimen.

La Figura 3.7 muestra 5 espectros de densidad obtenidos a diferentes edades para el espécimen M2-10. Se aprecia claramente que conforme se incrementa la edad de las probetas, también lo hace la frecuencia.

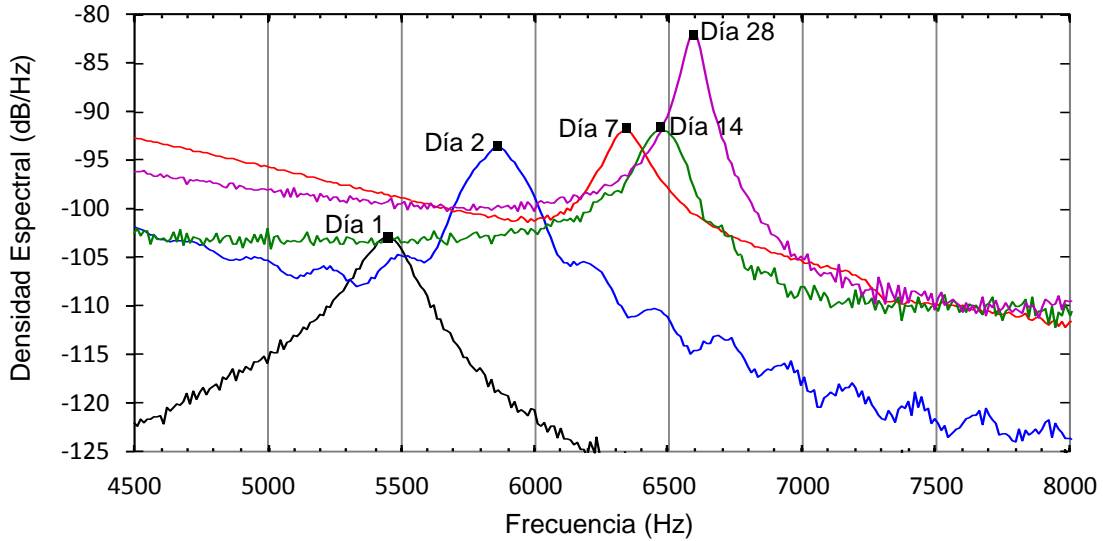


Figura 3.7. Evolución de frecuencia de resonancia longitudinal a las edades de 1, 2, 7, 14 y 28 días para el espécimen M2-10.

En la Figura 3.8 se muestran las frecuencias obtenidas para cada espécimen en función de la edad en que se realizó el ensayo. Cabe señalar que no todos los días se logró realizar los ensayos, debido a que no se tenía acceso al laboratorio los fines de semana ni los feriados. Los ensayos se realizaron a las edades de 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 17, 18, 23, 24 y 28 días, o hasta alcanzar la edad de rotura.

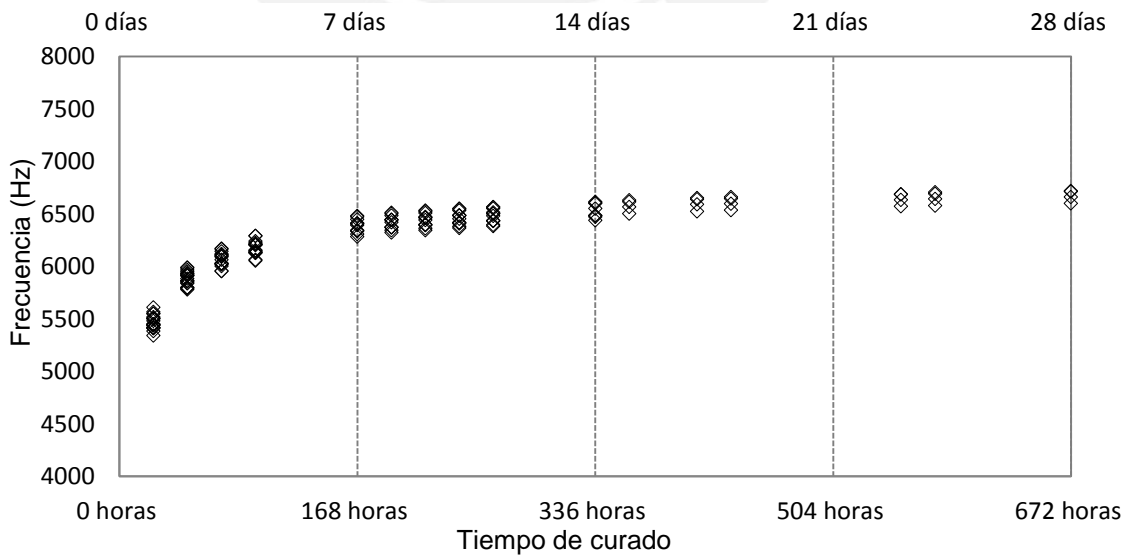


Figura 3.8. Frecuencias de resonancia longitudinal obtenidas de los especímenes fabricados en laboratorio

Finalmente, con los datos de frecuencia, geometría, masa y la Ecuación 2.9 se calculó el E_d del concreto. Los resultados se muestran en la Figura 3.9.

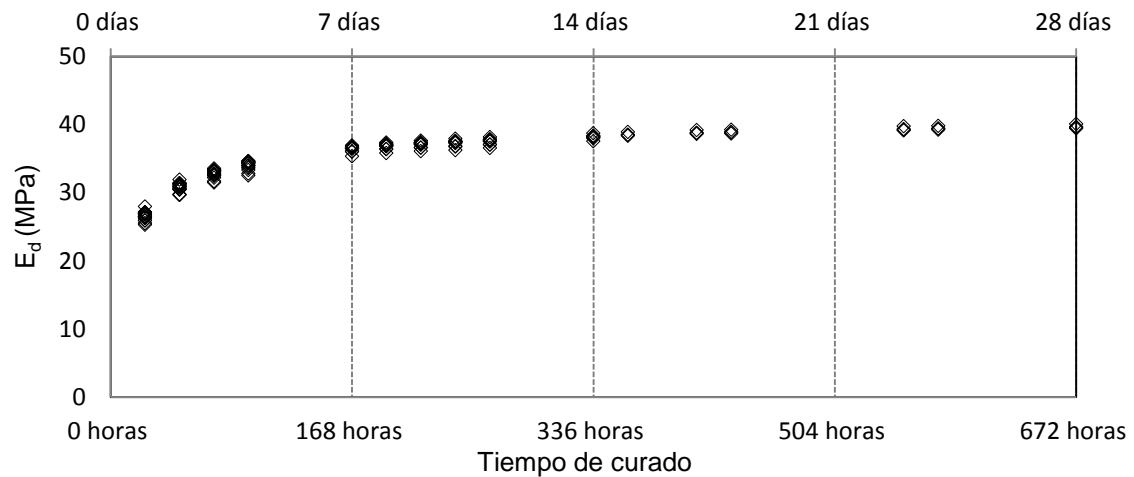


Figura 3.9. Módulo de elasticidad dinámico del concreto en los especímenes controlados en laboratorio

3.3. Ensayos para el análisis de la relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a la compresión.

3.3.1 Materiales y especímenes

Los 265 especímenes ensayados en esta sección tienen su origen en diferentes obras de la ciudad de Lima y llegaban a ser ensayados en el laboratorio de estructuras de la PUCP. De estos especímenes se pudo obtener datos de edad, geometría y masa. Tal como en la sección anterior, se realizaron ensayos de compresión y resonancia para obtener la resistencia a la compresión y el E_d . Todos los especímenes ensayados eran cilíndricos de 6"x12". La Figura 3.10 muestra parte de los especímenes ensayados.



Figura 3.10. Especímenes provenientes de obra.

En la Figura 3.11 se muestran los datos de edad de rotura, se puede observar que más del 75% de los especímenes, poseían edades menores a 28 días.

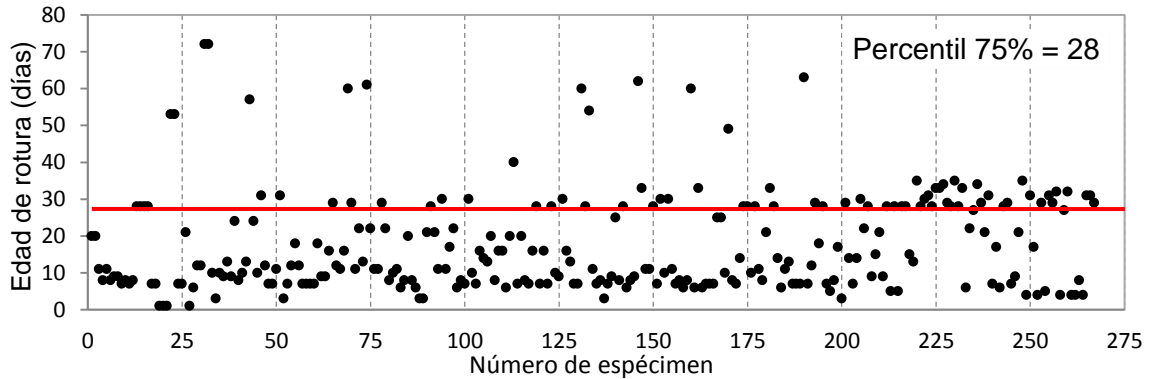


Figura 3.11. Edad de rotura en días de los especímenes provenientes de obra.

Las propiedades geométricas de diámetro y longitud de los especímenes, se encuentran en la Figura 3.12 y la Figura 3.13 respectivamente. El diámetro de todas las probetas es en promedio 151 mm, siendo su desviación estándar 1,6 mm (CV=1.06%). En el caso de la longitud, se tiene un promedio de 302 mm con una desviación estándar de 2,9 mm (CV=0.96%). El coeficiente de varianza ambos casos es menor al 2.5%.

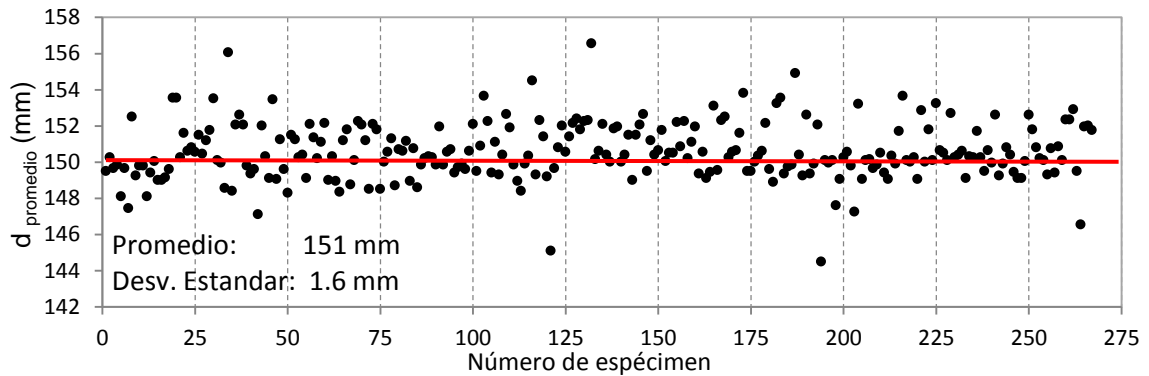


Figura 3.12. Diámetro promedio de los especímenes provenientes de obra.

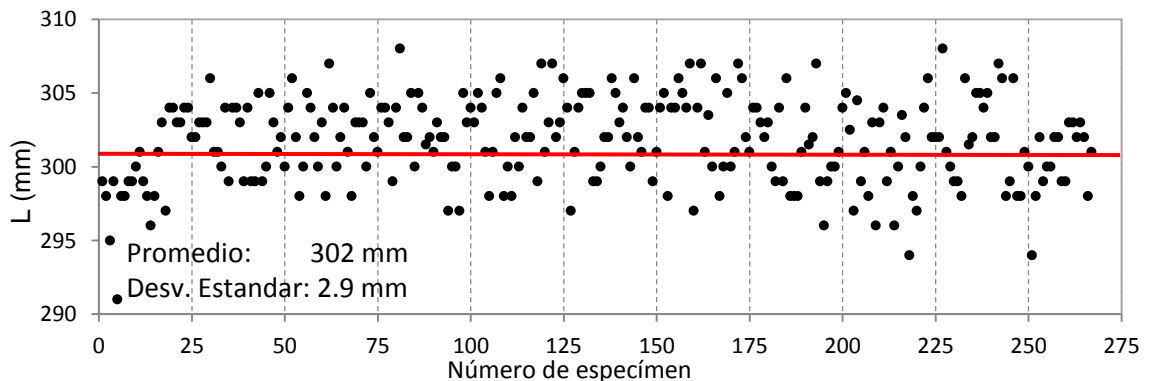


Figura 3.13. Longitud de los especímenes provenientes de obra.

La masa de cada espécimen se encuentra en la Figura 3.14 y posee una media de 12.81 Kg con una desviación estándar de 0.52 Kg (CV = 4.06%). El coeficiente de varianza para esta sección es menor 5%.

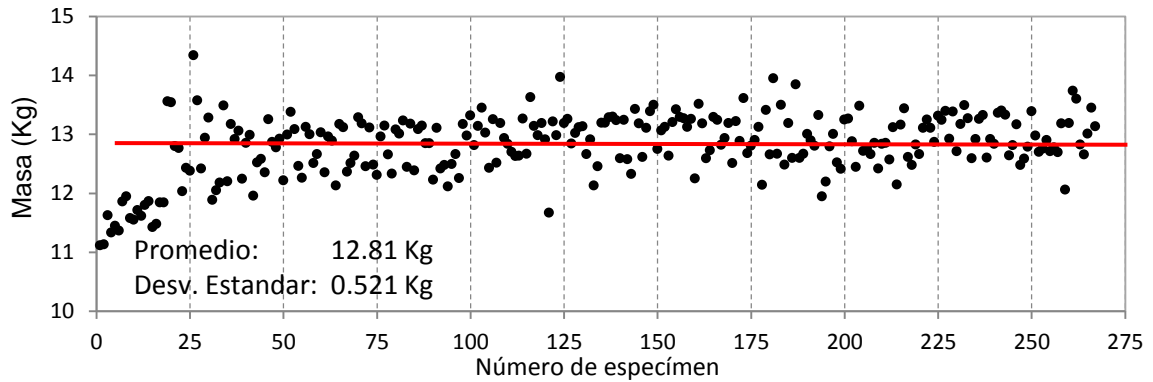


Figura 3.14. Masa de los especímenes provenientes de obra.

3.3.2 Ensayo de resistencia a la compresión

Los ensayos de resistencia a la compresión se llevaron a cabo haciendo uso de la norma ASTM C39. Los resultados de carga máxima (P), resistencia (f_c) y el tipo de falla, se muestran en las figuras Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17, respectivamente.

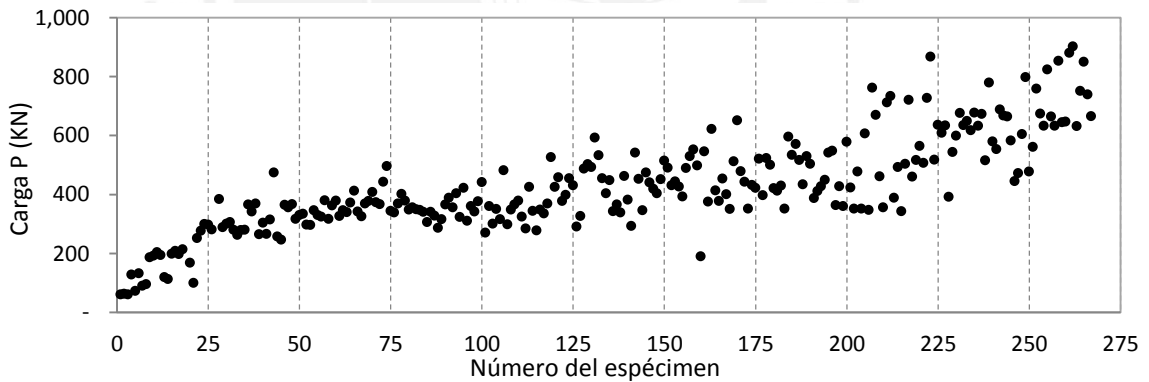


Figura 3.15. Carga máxima (P) obtenida para cada espécimen proveniente de obra.

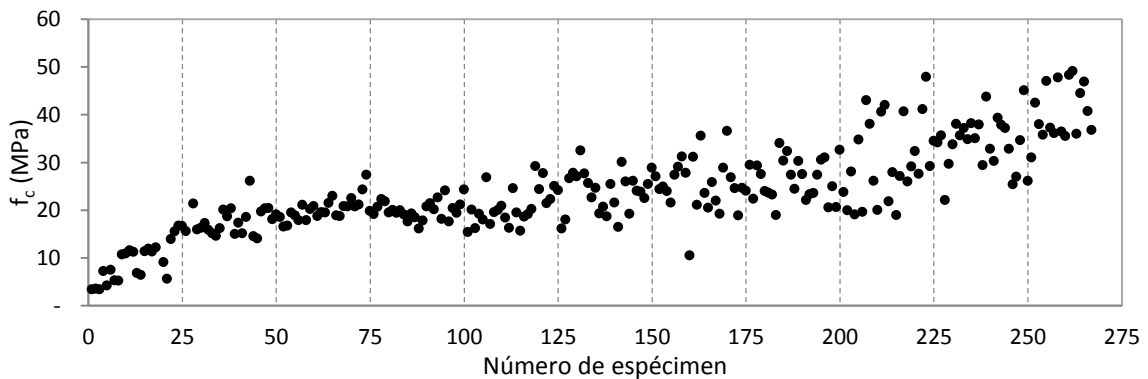


Figura 3.16. Resistencia a la compresión de los especímenes provenientes de obra.

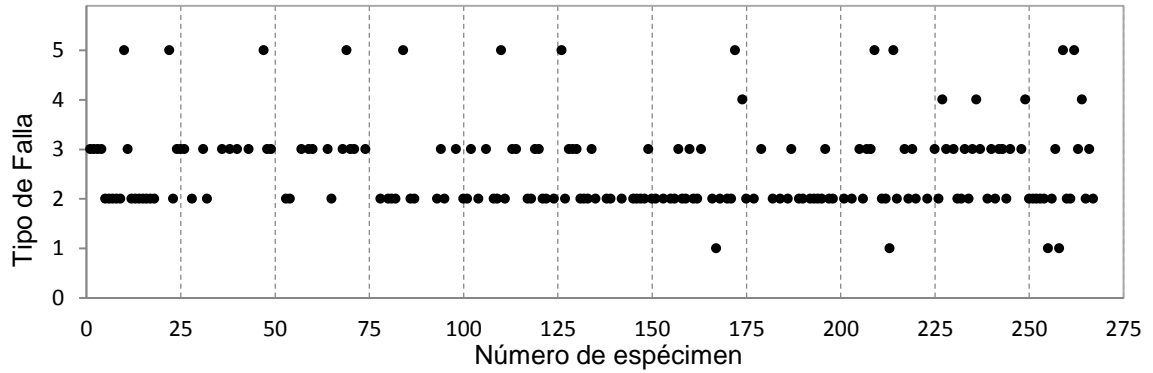


Figura 3.17. Tipo de falla de los especímenes provenientes de obra.

3.3.3 Ensayo de resonancia por impacto

Es importante señalar que los especímenes fueron ordenados en función a la frecuencia de resonancia longitudinal (de menor a mayor). Los resultados de módulos de elasticidad dinámico obtenidas de los especímenes provenientes de obra mediante la Ecuación 2.9, se muestran en la Figura 3.19.

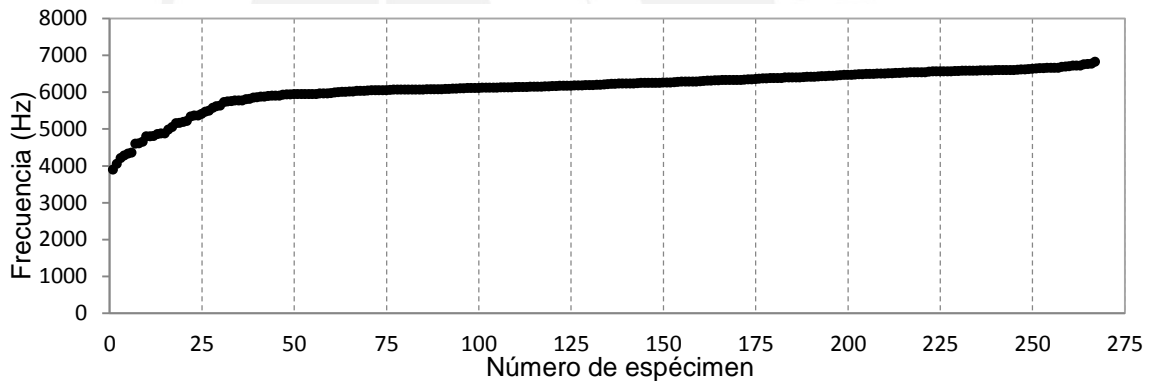


Figura 3.18. Frecuencia de resonancia longitudinal de los especímenes de obra.

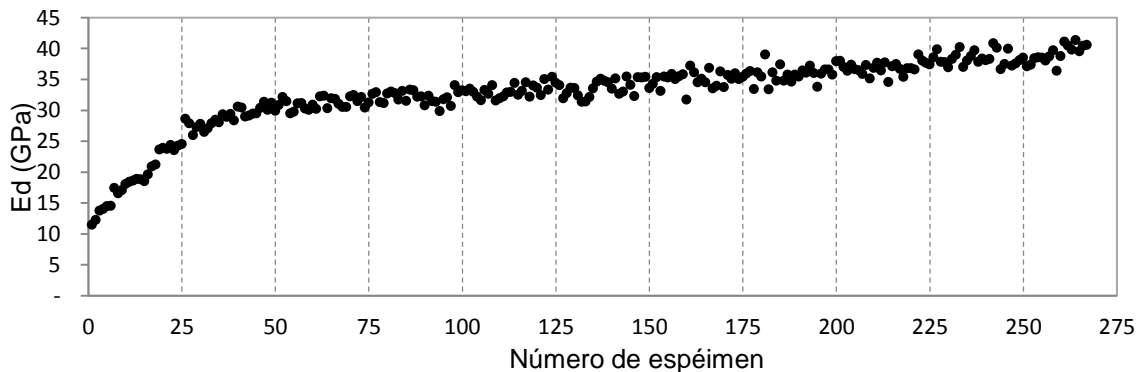


Figura 3.19. Módulo de elasticidad dinámico para los especímenes de obra.

3.4. Análisis y Discusión de Resultados

3.4.1 Evolución de la frecuencia de resonancia longitudinal y el E_d en el tiempo.

Como se observa en la Figura 3.8, el aumento de la frecuencia de resonancia longitudinal puede ser estimado a través de una regresión inversa, cuya forma básica se muestra en la Ecuación 3.1.

$$f(t) = f_{28} \left(1 - \frac{\beta}{t^\alpha} \right) \tag{Ecuación 3.1}$$

dónde:

- $f(t)$: frecuencia de resonancia longitudinal en función de la edad.
- t : edad del espécimen en horas
- f_{28} : frecuencia de resonancia a la edad de 672 horas (28 días).
- α y β : constantes.

Para que los valores de α y β aseguren que la curva estimada de frecuencias posea el menor error posible, se aplicó el método de los mínimos cuadrados en los especímenes que se ensayaron a compresión a la edad de 28 días. Para α y β iguales a 0.92 y 4.1 respectivamente, se obtuvo un error cuadrado medio de 37.1 Hz (menor al 1 %), y un coeficiente de correlación (R^2) de 0.987. La Figura 3.20 muestra el valor de f_{28} , la curva estimada con la Ecuación 3.1 y el valor real de la frecuencia.

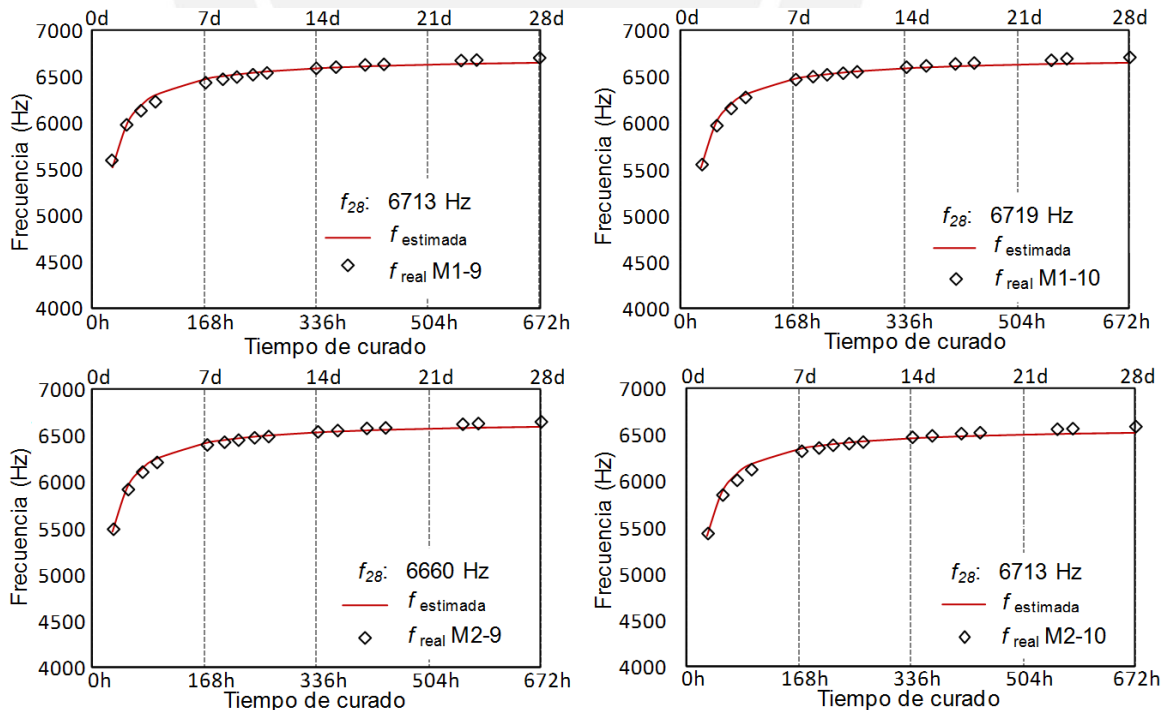


Figura 3.20. Evolución en el tiempo de la frecuencia longitudinal de los especímenes M1-9, M1-10, M2-9 y M2-10.

Reemplazando los valores de α y β en la Ecuación 3.1, se obtendrá la expresión:

$$f(t) = f_{28} \left(1 - \frac{4.1}{t^{0.92}} \right) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

La Ecuación 3.2 también puede ser utilizada para analizar la evolución de la frecuencia en los especímenes cuya edad de rotura fue menor a los 28 días, incluso se puede tener una idea de hasta cuanto podría crecer la frecuencia a la edad de 28 días. El desarrollo de las frecuencias reales y estimadas para estos especímenes se muestran en la Figura 3.21.

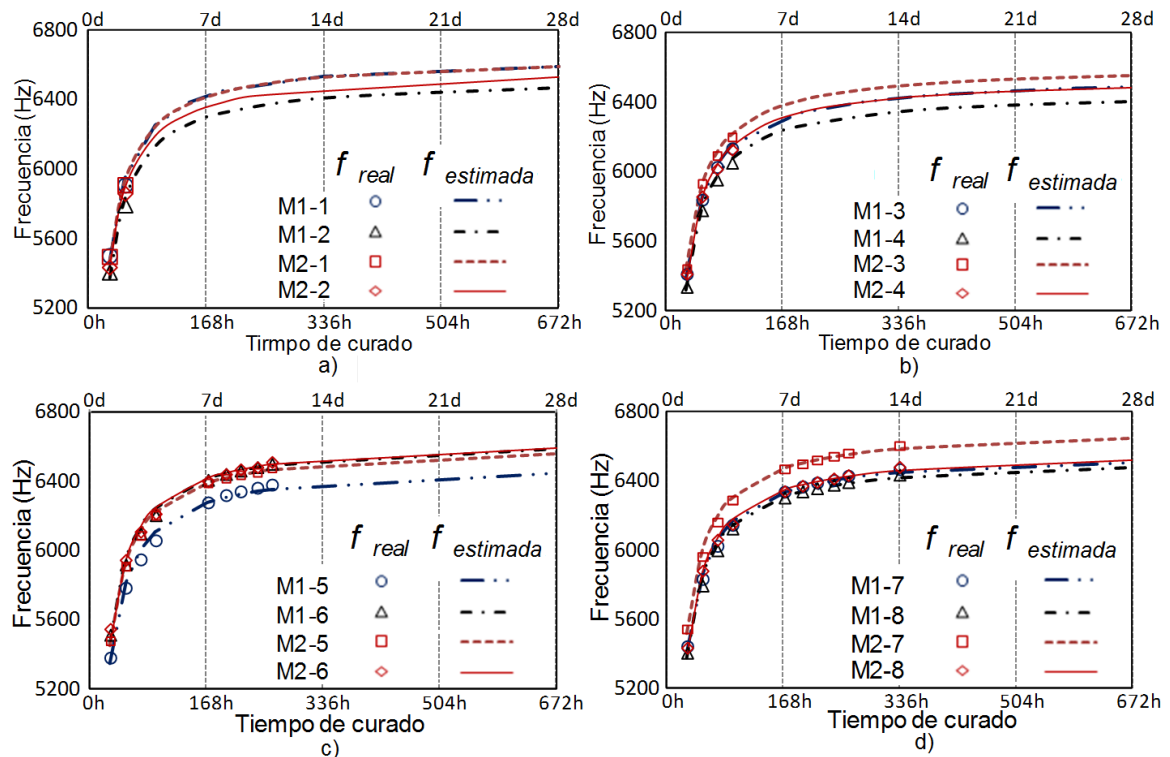


Figura 3.21. Predicción de las frecuencias de resonancia hasta los 28 días de los especímenes con edad de rotura de (a) 2 días, (b) 4 días, (c) 11 días y (d) 14 días.

Para realizar el análisis de la evolución del E_d en el tiempo se utilizó la Ecuación 3.3, la cual posee una forma básica similar a la presentada en el análisis de frecuencias.

$$E_d(t) = E_{d(28)} \left(1 - \frac{\beta}{t^\alpha} \right) \quad \text{Ecuación 3.3}$$

dónde:

- $E_{d(t)}$: Módulo de elasticidad dinámico en función de la edad.
- t : edad del espécimen en horas.
- $E_{d(28)}$: Módulo de elasticidad dinámico a la edad de 28 días.
- α y β : constantes.

Los valores de α y β obtenidos haciendo uso del método de los mínimos cuadrados fueron de 0.7 y 3.2 respectivamente, con un error cuadrado medio de 0.48 GPa (menor al 2%) y un R^2 de 0.976. Reemplazando los valores de α y β en la Ecuación 3.3, se obtiene la siguiente expresión:

$$E_d(t) = E_{d(28)} \left(1 - \frac{3.2}{t^{0.7}} \right) \tag{Ecuación 3.4}$$

Dado que los parámetros $E_{d(t)}$ y t son conocidos, para los especímenes cuya edad de rotura era menor a los 28 días se pudo estimar el valor de $E_{d(28)}$ mediante la Ecuación 3.4. La Figura 3.22 muestra los valores de $E_{d(28)}$ estimado para cada espécimen, así como los $E_{d(28)}$ reales (mínimo y máximo) obtenidos durante la campaña experimental.

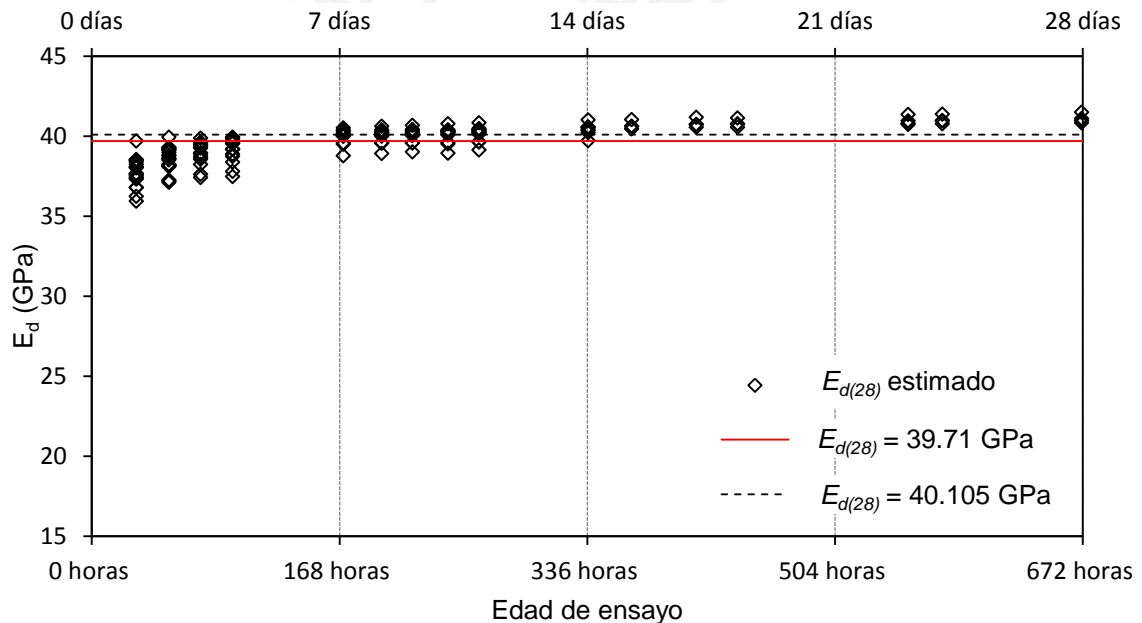


Figura 3.22. $E_{d(28)}$ estimado en función al tiempo ($t = i$) y al $E_{d(t=i)}$.

Cabe señalar que en un mismo espécimen, el valor del $E_{d(28)}$ variará ligeramente en función a la tiempo en que se aplique la Ecuación 3.4. Para graficar el desarrollo de la evolución del E_d se tomó en cuenta el $E_{d(28)}$ promedio correspondiente a cada espécimen. Con los valores estimados de $E_{d(28)}$, se puede construir la curva de la evolución del módulo de elasticidad dinámico en el tiempo para todos los especímenes. La Figura 3.23 muestra la evolución en el tiempo del E_d real y el E_d predicho para cada espécimen.

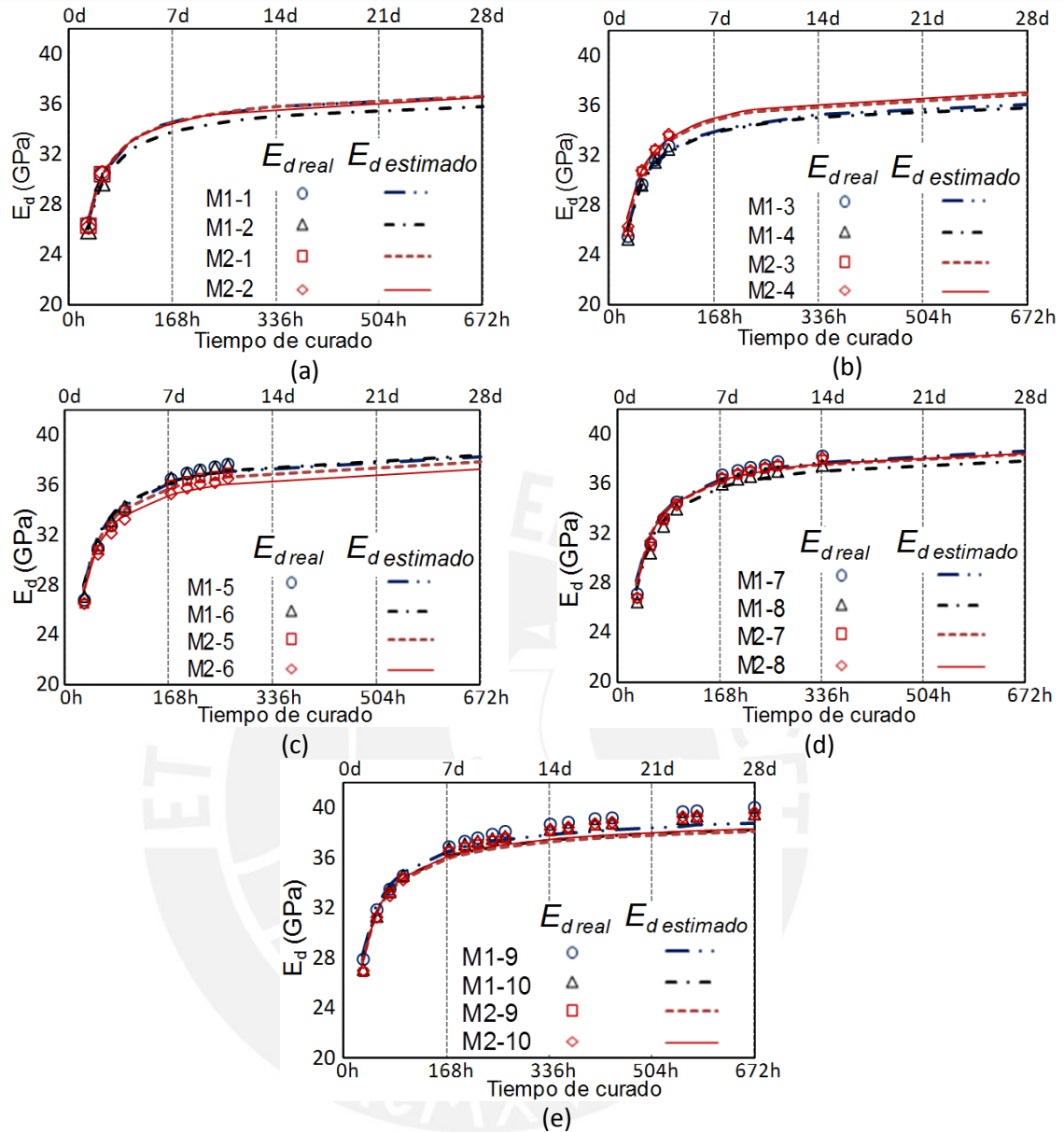


Figura 3.23. Evolución y predicción en el tiempo del E_d de los especímenes con edad de rotura de (a) 2 días, (b) 4 días, (c) 11 días, (d) 14 días y (e) 28 días.

3.4.2 Análisis de la relación entre el E_d y la resistencia a la compresión (f_c) de los especímenes provenientes de obra.

Los resultados obtenidos mediante ensayos de resonancia (E_d) y resistencia a la compresión (f_c), se muestran en la Figura 3.24. Para poder estimar de forma preliminar f_c en función de E_d , se utilizó la regresión exponencial presentada en la Ecuación 3.5, obteniéndose un coeficiente de determinación (R^2) de 0.785.

$$f_c = 2.2e^{0.07E_d}$$

Ecuación 3.5

El error encontrado es grande, sin embargo es razonable, debido a que la base de datos contiene especímenes de provenientes de una gran variedad de obras y elementos estructurales de la ciudad de Lima. Además, es probable que los especímenes hayan sido fabricados con diferentes tipos de cemento, relaciones A/C, agregados, diseños de mezcla, aditivos o condiciones de curado.

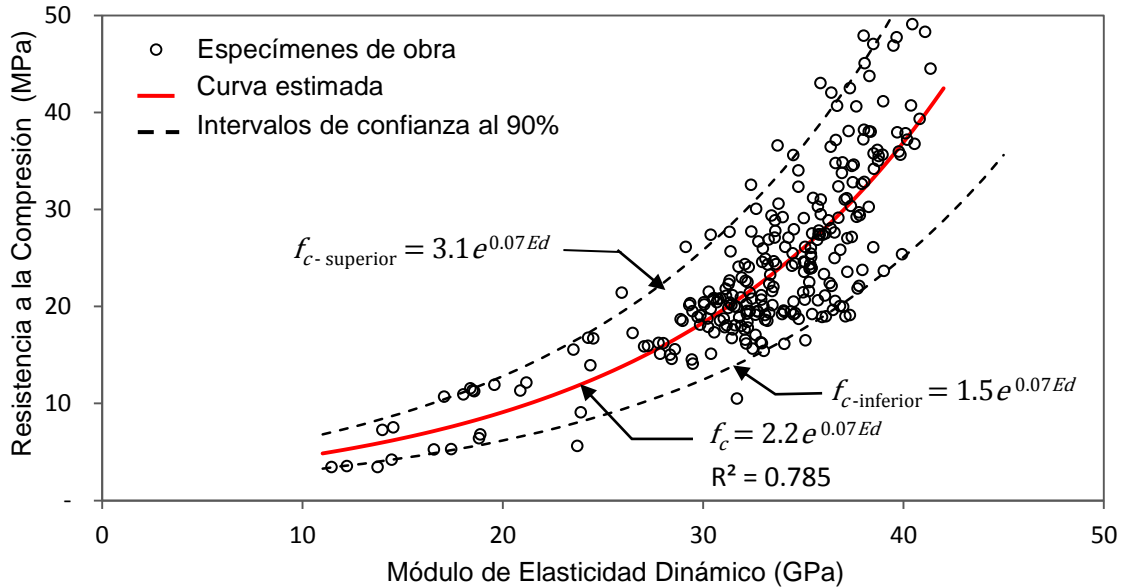


Figura 3.24. Resultados de la relación entre el E_d y el f_c (Aguilar et al., 2016)

Así mismo, se utilizó intervalos de confianza del 90%, obteniéndose la Ecuación 3.6 para el límite inferior y la Ecuación 3.7 para el límite superior.

$$f_{c inferior} = 1.5e^{0.07E_d} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$f_{c superior} = 3.1e^{0.07E_d} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Una forma adicional de realizar el control de calidad en obra del concreto, podría ser estimando el valor de $E_{d(28)}$ mediante la Ecuación 3.4. Con los valores estimados del $E_{d(28)}$ se podrá predecir el valor de la resistencia a la compresión a los 28 días (f'_c), haciendo uso de la Ecuación 3.6. La Figura 3.25 muestra el valor de f'_c estimado así como el valor mínimo de f'_c registrado en la campaña experimental. Una de las mayores ventajas que este método presenta, es que se podría tener una idea de la resistencia a compresión de un espécimen desde edades muy tempranas.

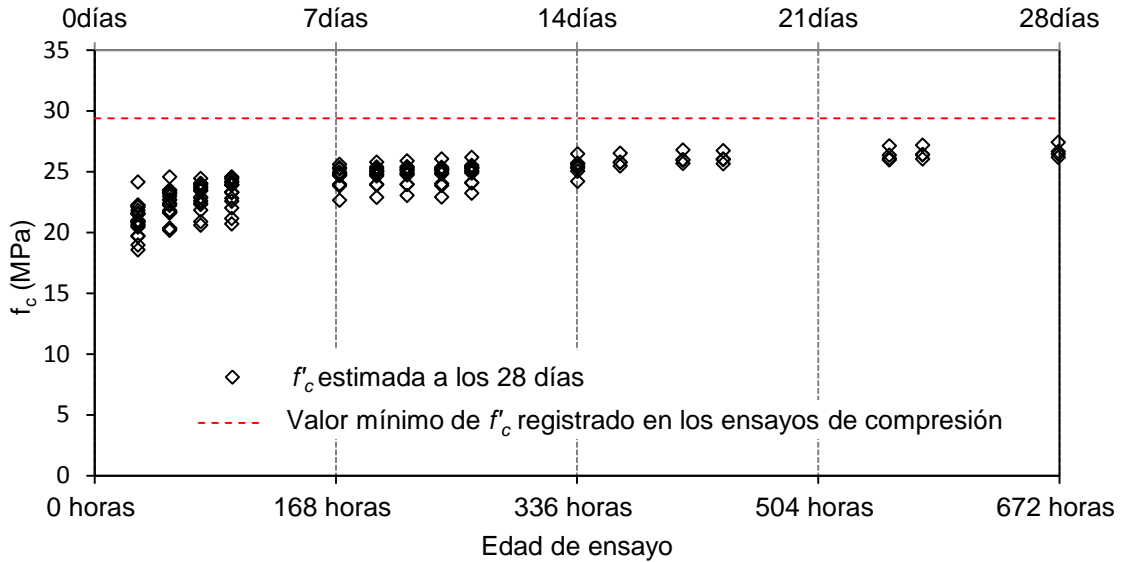


Figura 3.25. Estimación del valor de f_c de los especímenes elaborados en laboratorio haciendo uso de la Ecuación 3.6 obtenida de los especímenes provenientes de obra.

Adicionalmente, con la finalidad de validar las ecuaciones preliminares propuestas, se analizaron 181 especímenes adicionales provenientes de diferentes obras de la ciudad de Lima, y ensayados en el Laboratorio de estructuras de la PUCP. Los resultados se muestran en la Figura 3.26.

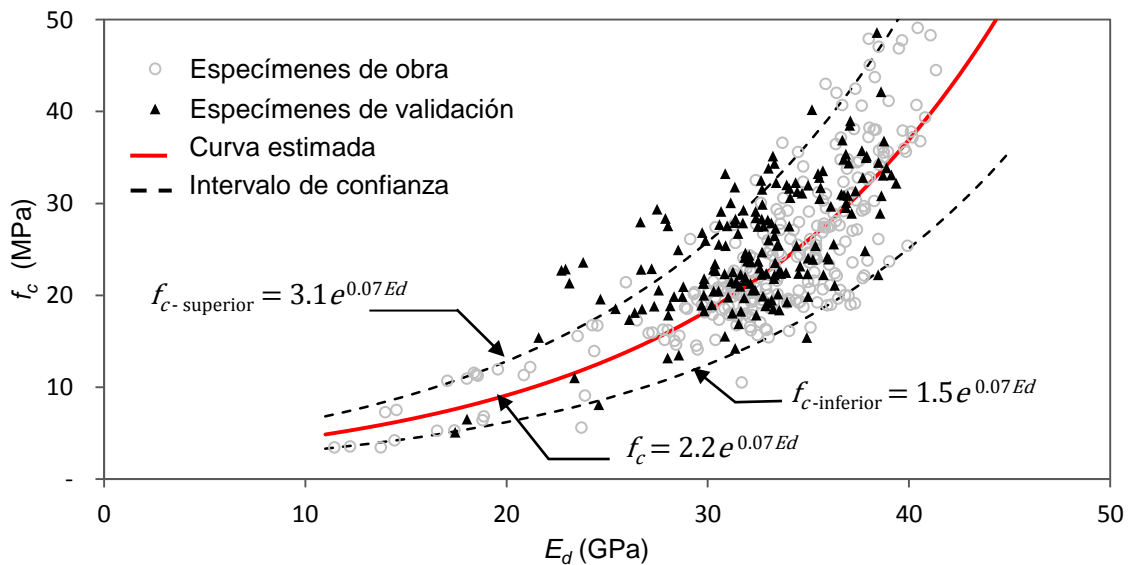


Figura 3.26. E_d versus f_c obtenido para los especímenes de validación.

Con los resultados presentados en la Figura 3.26 se valida la Ecuación 3.6 correspondiente al límite inferior, ya que solo 2.2% de los valores de resistencia estimados están subvalorados.

3.5. Conclusiones

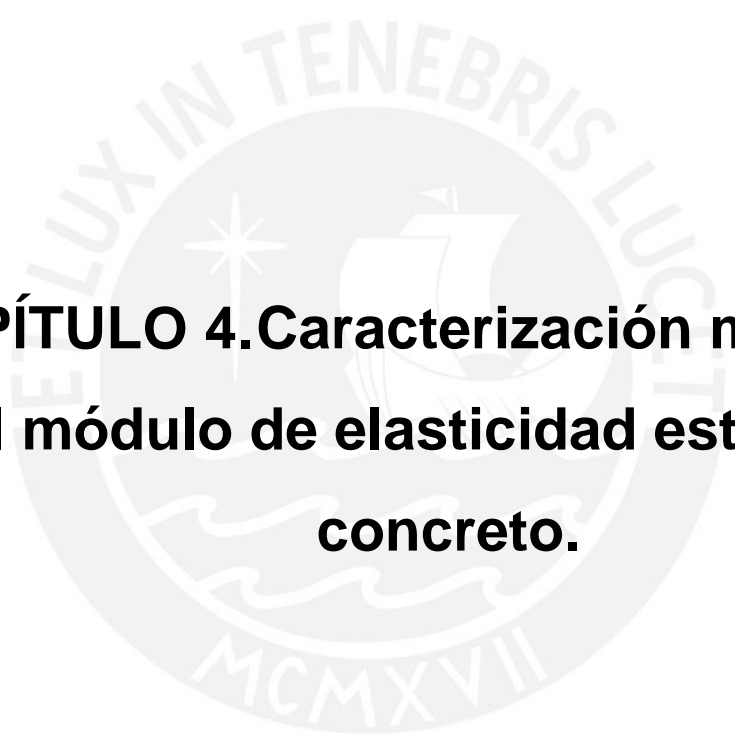
La evolución en el tiempo de la frecuencia de resonancia longitudinal puede ser estimada con precisión ($R^2 = 0.987$) mediante una regresión inversa. Del mismo modo que la frecuencia, la evolución en el tiempo del módulo elasticidad dinámico, también puede ser estimada con precisión ($R^2 = 0.976$) mediante una regresión inversa.

El módulo de elasticidad dinámico a la edad de 28 días de un espécimen puede ser estimado mediante la Ecuación 3.4. A edades tempranas el error encontrado fue mayor (aproximadamente 8% cuando la edad del espécimen era de un día), sin embargo mientras mayor era la edad de estimación se obtuvieron valores más precisos (error promedio de 3%, cuando la edad del espécimen era mayor a los 14 días).

Se propone utilizar la Ecuación 3.6 (correspondiente al límite inferior) como la correlación más adecuada para estimar f_c en función de E_d , debido que los valores obtenidos resultan siendo más conservadores que aquellos utilizados mediante la Ecuación 3.5 o Ecuación 3.7. El límite inferior, puede ser utilizado para realizar inspecciones rápidas para el aseguramiento y control de la calidad. Esto se lograría, comparando el E_d medido en campo con el E_d obtenido haciendo uso de la Ecuación 3.6, tomando como dato de entrada la resistencia a la compresión especificada en el diseño. La Ecuación 3.6 aseguraría que el valor real de f_c sea mayor al f_c estimado con un 90% de probabilidad. En caso se obtuviese valores menores de f_c , los resultados encontrados deberían corroborarse con ensayos destructivos.

Haciendo uso de la Ecuación 3.4 y la Ecuación 3.6, se puede estimar el valor de f'_c desde cualquier edad, incluso apenas se realice el desencofrado del espécimen. Como se observa en la Figura 3.25, cuando la edad de estimación es menor el error es considerable (error aproximado a la edad de 1 día = 30%). Sin embargo, conforme mayor sea la edad de estimación, se tendrá mayor precisión al momento de estimar f'_c (error aproximado a la edad de 28 días = 9%).

La relación preliminar entre el E_d y f_c propuesta en esta investigación, podría ser mejorada en futuros trabajos en donde se incremente la base de datos y además subdividiendo los resultados en función de parámetros adicionales como diseños de mezcla, tipos de cemento, tipos de agregados, edad, influencia de aditivos y condiciones curado.



**CAPÍTULO 4. Caracterización mecánica
del módulo de elasticidad estático del
concreto.**

4.1. Introducción

Esta sección tiene dos objetivos. El primero, es evaluar el desarrollo en el tiempo de los módulos de elasticidad estáticos: E_{tan-o} , E_{sec} , E_{ch} del concreto, obtenidos según la norma ASTM C469 (ASTM, 2013). Para este análisis se utilizaron los mismos especímenes descritos en la sección 3.2.1, 20 en total, con las dimensiones tradicionales de 6"x12", fabricados y curados en laboratorio. El segundo objetivo, consistió en evaluar el desarrollo en el tiempo desde el momento de vaciado, del módulo de elasticidad del concreto mediante la técnica EMM-ARM (E_{ARM}) propuesta en Azenha (2012). Este propósito se llevará a cabo mediante la fabricación de una viga de sección cilíndrica simplemente apoyada. Adicionalmente, se estudiará las relaciones entre los módulos E_{ARM} , E_{tan-o} , E_{sec} , E_{ch} , E_d y el valor de f_c del concreto.

4.2. Evaluación del módulo de elasticidad obtenido acorde ASTM C469

4.2.1 Equipos y procedimiento

El equipo del ensayo consistió de un maquina universal equipada con celda de carga fabricada por HBM con una capacidad de 2000 kN. Para medir la deformación, se utilizó un LVDT con una precisión de 50E-12 m. Los especímenes fueron ensayados a las edades de 2, 4, 11, 14 y 28 días. Cada día se ensayó 4 especímenes. La Figura 4.1 muestra el esquema general en que se realizaron los ensayos.

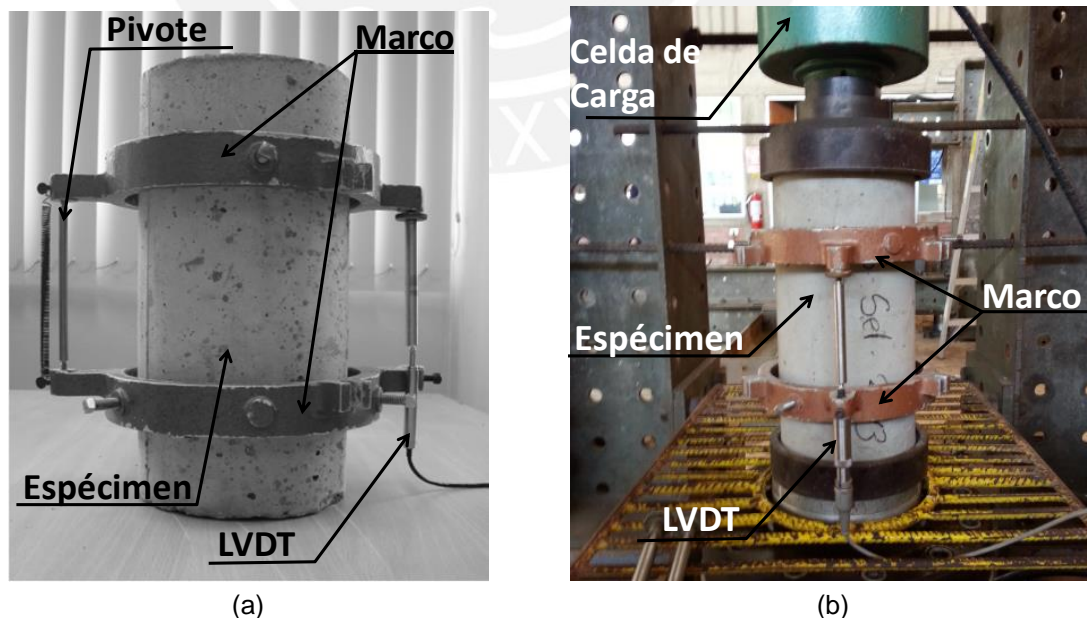


Figura 4.1. Esquema del ensayo para obtener la curva esfuerzo - deformación, (a) configuración del LVDT y (b) configuración general del ensayo

Para realizar el ensayo, primero se deberá colocar los anillos de sujeción el espécimen. Con ayuda de dos elementos verticales se acomodó los anillos al espécimen ajustando los pernos que estos posee. Ajustados los pernos, se acopló el LVDT. A continuación se procedió a colocar el espécimen en el marco de carga. Finalmente, la aplicación de la carga a una velocidad constante de 40 kN/min hasta alcanzar la rotura.

El módulo E_{tan-o} , se calculó utilizando los primeros 200 puntos de las gráficas de esfuerzo deformación. En tanto, el módulo E_{ch} se calculó según lo estipulado por la norma ASTM C469 (ASTM, 2002), tomando en consideración la deformación desde el punto 50 millonésimas hasta el correspondiente al 40% de la carga máxima, mediante la Ecuación 2.6. El módulo E_{sec} , se calculó considerando la deformación desde el punto 0 hasta el correspondiente al 40% de la carga (Ecuación 2.7).

4.2.2 Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados obtenidos de E_{sec} , E_{ch} y E_{tan-i}

Espécimen	Tiempo (horas)	E_{sec} (GPa)	E_{ch} (GPa)	E_{tan-o} (GPa)
M1-1	48	22.04	21.16	38.47
M1-2	48	20.30	19.56	25.05
M1-3	120	21.77	20.91	29.96
M1-4	120	21.27	20.38	30.15
M1-5	264	27.06	26.28	35.24
M1-6	264	23.92	22.73	38.40
M1-7	336	28.37	27.78	34.94
M1-8	336	33.45	31.77	55.25
M1-9	672	28.16	27.57	33.50
M1-10	672	28.35	27.62	39.04
M2-1	48	21.28	20.48	30.65
M2-2	48	21.60	21.12	27.36
M2-3	120	21.07	20.07	31.05
M2-4	120	25.90	25.33	29.44
M2-5	264	26.32	25.52	35.93
M2-6	264	27.06	25.83	42.96
M2-7	336	25.73	25.33	32.19
M2-8	336	28.19	27.70	35.28
M2-9	672	28.70	28.19	38.93
M2-10	672	27.83	27.33	34.03

La Figura 4.2, muestra el promedio de los módulos en el tiempo.

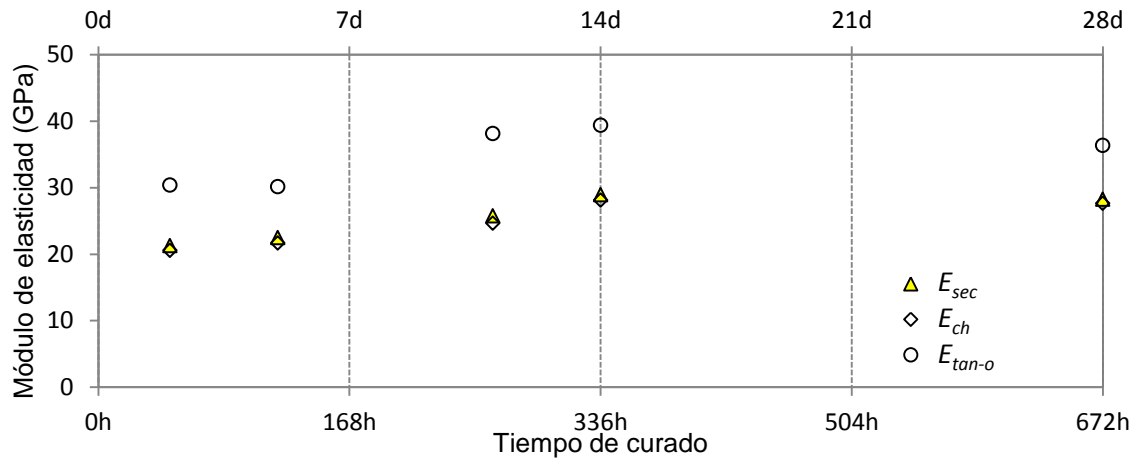


Figura 4.2. Tiempo de curado versus E_{sec} , E_{ch} y E_{tan-o}

4.3. Evaluación del módulo de elasticidad obtenido mediante el método EMM-ARM

4.3.1 Materiales y especímenes

El método EMM-ARM fue realizado de acuerdo con la implementación original propuesta por Azenha (2010). La mezcla de concreto que se utilizó para realizar este ensayo, corresponde a la misma presentada en la Tabla 3.1. El encofrado consistió de un tubo de acrílico, sus características se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Propiedades del acrílico utilizado como encofrado

Propiedad	Unidades	Valor
Densidad	kN/m ³	11.71
Diámetro Interior	mm	92.89
Diámetro exterior	mm	99.31
Espesor	mm	3.21
Radio Interior	m	0.04645
Radio Exterior	m	0.04966
Área sección transversal	m ²	0.00097
Peso	kN/ml	0.01135
Masa	kg/ml	1.15724
Momento de Inercia	m ⁴	1.120E-06
Longitud	m	1.70
Módulo de elasticidad	GPa	3.8

Para calcular el módulo de elasticidad del acrílico se utilizó la Ecuación 2.18, previamente se midió su masa y su frecuencia (25.3 Hz).

4.3.2 Equipos y procedimiento

Este método fue aplicado en un espécimen de concreto cilíndrico durante 28 días. Los equipos requeridos para su realización se muestran a continuación:

- Un acelerómetro de masa igual a 25 gramos, fabricado por PCB Piezotronics, Modelo 352b cuya sensibilidad es de 978 m-Volts/g.
- Un material plástico adhesivo, para mantener el acelerómetro junto al espécimen.
- El equipo de adquisición fue fabricado por National Instruments, modelo DAQ-NI 9234. Este dispositivo portátil cuenta con 4 canales y una resolución de 24 bits.
- El software usado para importar y procesar las señales se denomina Automatic Modal Analyzer 2009 V2.0 y fue elaborado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Minho – Portugal en R. Aguilar y R. Ramos (2009).

Antes de realizar el vaciado, se realizaron perforaciones en el acrílico. En las perforaciones se colocaron varillas de acero corrugadas de 8 mm para evitar que el concreto se asiente, asegurando un contacto permanente entre el concreto y encofrado. El encofrado se colocó diagonalmente y conforme se iba vaciando concreto en el acrílico, se aplicaron golpes con un martillo de goma para llenar los espacios vacíos. Se utilizaron abrazaderas metálicas para confinar el encofrado y evitar que se ensanche o altere su geometría. Finalmente, se aplicó una vibración al espécimen mediante una cama vibratoria para asegurar una buena compactación de la mezcla. La Figura 4.3 muestra el espécimen recién fabricado. Cabe señalar que el acrílico actúa como material impermeabilizante de modo que el agua no se pierde por evaporación.

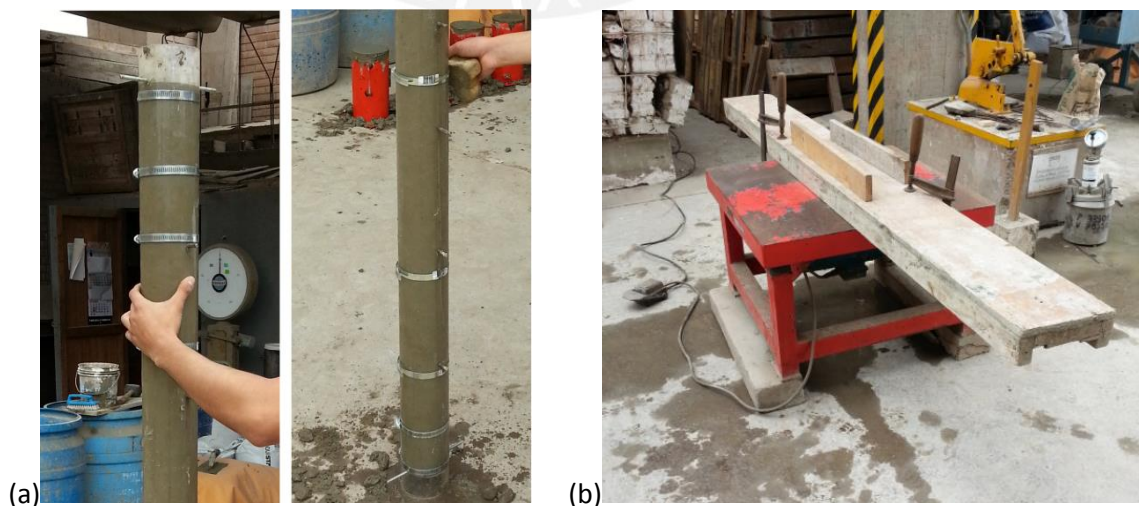


Figura 4.3. (a) Especimen luego del vaciado y (b) cama de vibrado

Terminada la compactación se colocó el espécimen de acuerdo al esquema teórico presentado en la Figura 2.7b, tal como se muestra en la Figura 4.4.

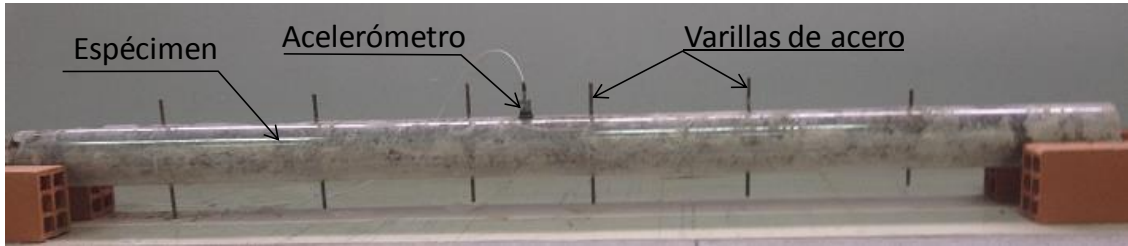


Figura 4.4. Configuración del espécimen para la obtención del E_{ARM}

La adquisición de datos se dio con un ratio de muestreo 200 Hz, debido a que la máxima frecuencia esperada era menor a los 100 Hz. Dado que este método se realiza de forma continua y automática, la adquisición de datos se programó para que de cada 10 minutos se adquiriera una señal de 5 minutos de duración, este proceso se dio durante 28 días. Además se asumió un amortiguamiento en el rango de 0.1% y 10.0%. La Figura 4.5 muestra el conjunto de señales obtenidas a lo largo de los 28 días y la frecuencia de resonancia a 2 edades diferentes mediante el método de Welch (1969).

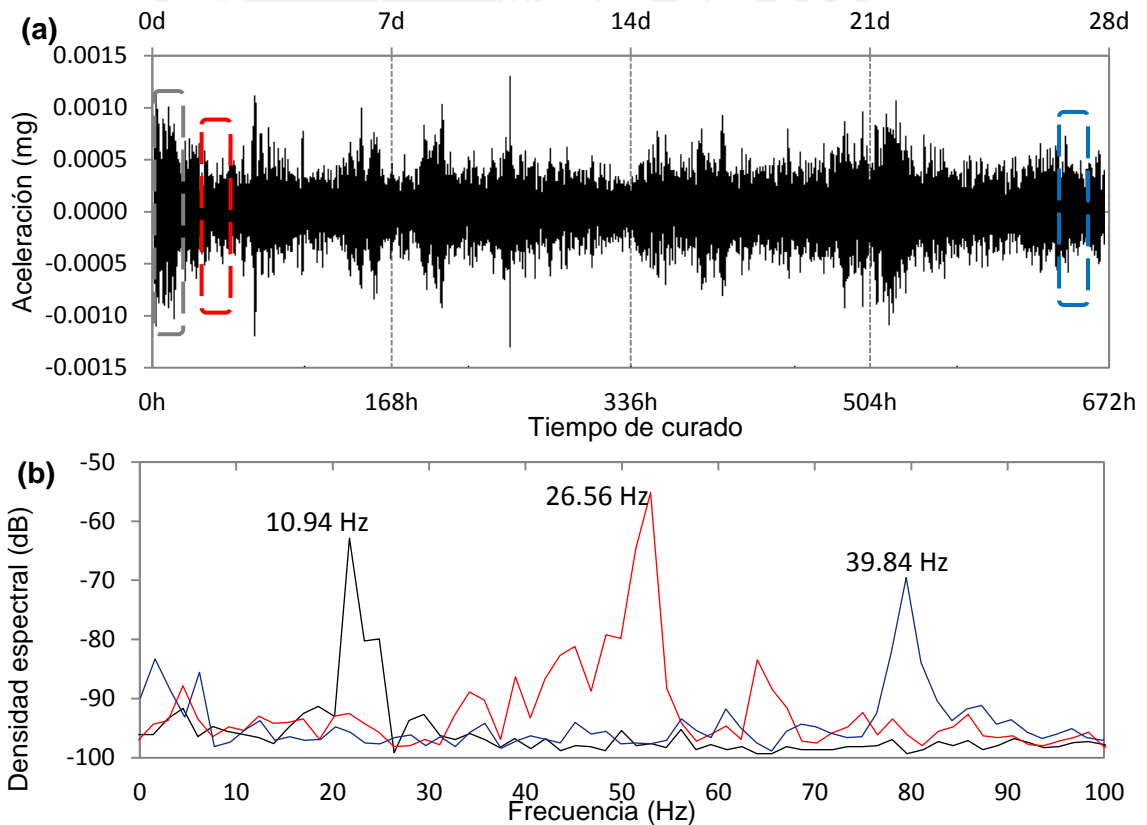


Figura 4.5. (a) Conjunto de señales en el tiempo, (b) frecuencia de resonancia a las edades de 5, 10 y 650 horas.

La conversión de todas las señales con dominio en el tiempo a señales con dominio en la frecuencia se realizaron automáticamente mediante el software Automatic Modal Analyzer 2009 V2.0. La Figura 4.6, corresponde a la intensidad espectral; es decir, los puntos más oscuros en la gráfica representan las frecuencias de mayor intensidad espectral o frecuencia de resonancia.

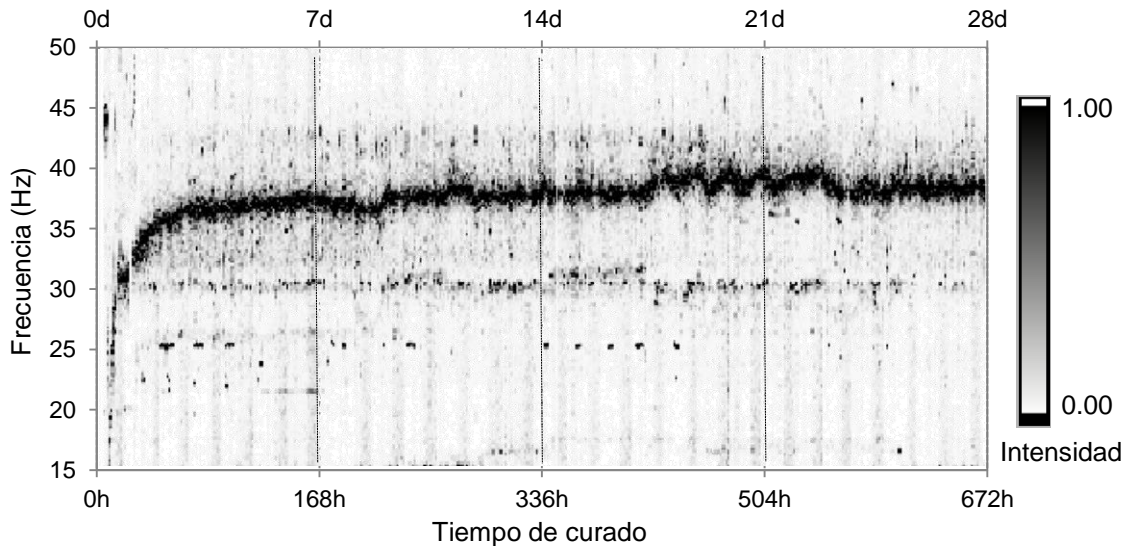


Figura 4.6. Intensidad de frecuencias obtenidas.

Una vez obtenida la frecuencia de resonancia en cada instante durante los 28 días, el cálculo del módulo de elasticidad del concreto (E_{ARM}) se realizó mediante la combinación de la Ecuación 2.18 y la Ecuación 2.20. Esta combinación se muestra en la Ecuación 4.1. La Tabla 4.3, muestra el valor correspondiente a cada parámetro.

$$E_{ARM} = \frac{4L^4 f^2 (m_{ARM} + m_{ac})}{\pi^2 I_{ARM}} - E_{ac} I_{ac} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Tabla 4.3. Propiedades del espécimen de concreto y el encofrado de acrílico.

Parámetro	Unidad	valor	Descripción
L	m	1.70	Longitud del espécimen de concreto
M_{ARM}	kg/ml	16.50	Masa del espécimen de concreto
I_{ARM}	m ⁴	3.66E-06	Inercia de la sección transversal del concreto
M_{ac}	kg/ml	1.16	Masa del encofrado de acrílico
I_{ac}	m ⁴	1.12E-06	Inercia de la sección transversal del encofrado
E_{ac}	Pa	3.80E+09	Módulo de elasticidad del acrílico
f	Hz	Variable	Frecuencia de resonancia
E_{ARM}	Pa	Variable	Módulo de elasticidad del concreto

4.3.3 Resultados

Los resultados obtenidos de frecuencia y módulo de elasticidad se muestran en la Figura 4.7. Es importante señalar que el procesamiento de los datos se realizó por tramos, con el propósito de conseguir un valor de frecuencia más precisa.

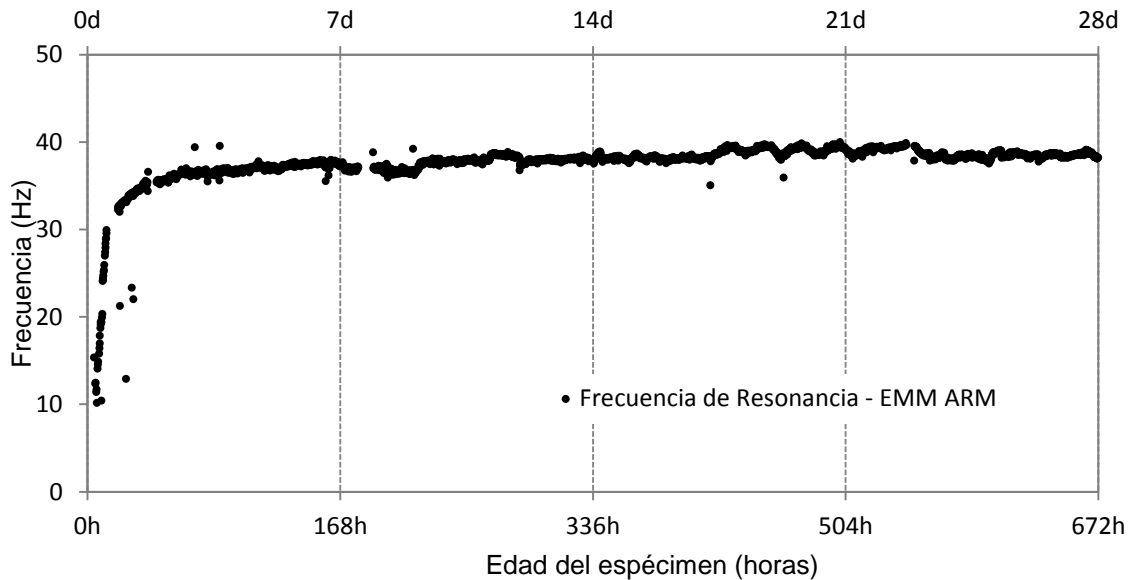


Figura 4.7. Frecuencia EMM-ARM

Los resultados obtenidos de módulo de elasticidad se muestran en la Figura 4.8. Se debe notar que los resultados presentados en esta grafica poseen unidades de GPa, esto se logró dividiendo el resultado de la Ecuación 4.1 entre 10E+09.

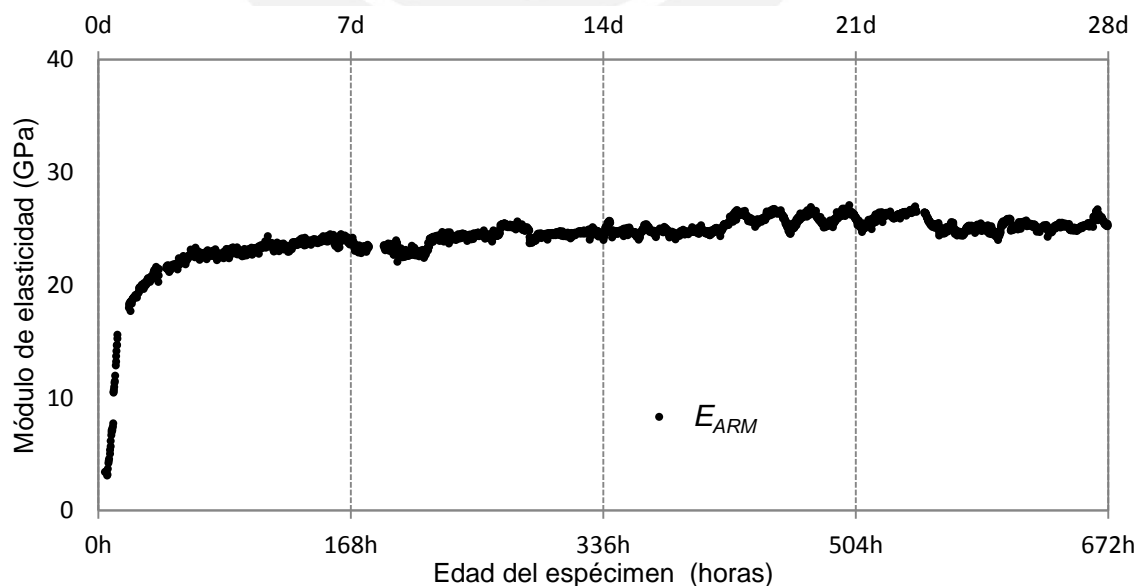


Figura 4.8. Desarrollo en el tiempo del E_{ARM}

4.4. Análisis y discusión de resultados

4.4.1 Análisis de la evolución de la frecuencia y el E_{ARM}

Para el análisis de crecimiento de la frecuencia, se utilizó una expresión con la misma forma básica presentada en la Ecuación 3.1. Haciendo uso del método de los mínimos cuadrados se obtuvo valores de α y β son iguales a 0.92 y 3.15 respectivamente con un error cuadrado medio de 0.86 Hz (aproximadamente el 4.3%).

$$f_{ARM}(t) = f_{28} \left(1 - \frac{3.15}{t^{0.92}} \right) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

dónde:

$f_{ARM}(t)$: frecuencia en función de la edad obtenida mediante EMM-ARM.

t : edad del espécimen en horas

f_{ARM-28} : frecuencia a la edad de 672 horas (28 días), igual a 38.5 Hz

La frecuencia estimada haciendo uso de la Ecuación 4.2, se muestra en la Figura 4.9. Es importante mencionar que se obtuvo un coeficiente de correlación $R^2 = 0.838$.

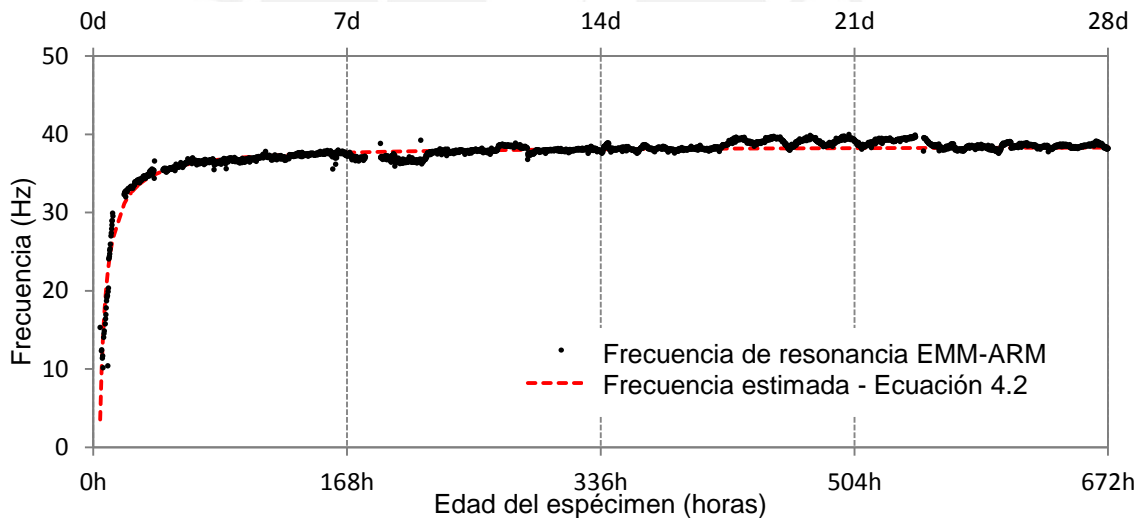


Figura 4.9. Análisis del desarrollo de la frecuencia EMM-ARM

El mismo análisis se realizó para evaluar el desarrollo del E_{ARM} . Los valores de α y β hallados fueron de 0.7 y 2.4 respectivamente, mientras que el error cuadrado medio de 0.91 GPa (aproximadamente el 5.0%).

$$E_{ARM}(t) = E_{ARM-28} \left(1 - \frac{2.4}{t^{0.7}} \right) \quad \text{Ecuación 4.3}$$

dónde:

$E_{ARM}(t)$: Módulo de elasticidad E_{ARM} en función de la edad.

t : edad del espécimen en horas

E_{ARM-28} : Módulo E_{ARM} a la edad de 672 horas (28 días), igual a 26 GPa

El módulo de elasticidad E_{ARM} estimado mediante la Ecuación 4.3, se muestra en la Figura 4.10. El coeficiente de correlación en este caso fue $R^2 = 0.808$.

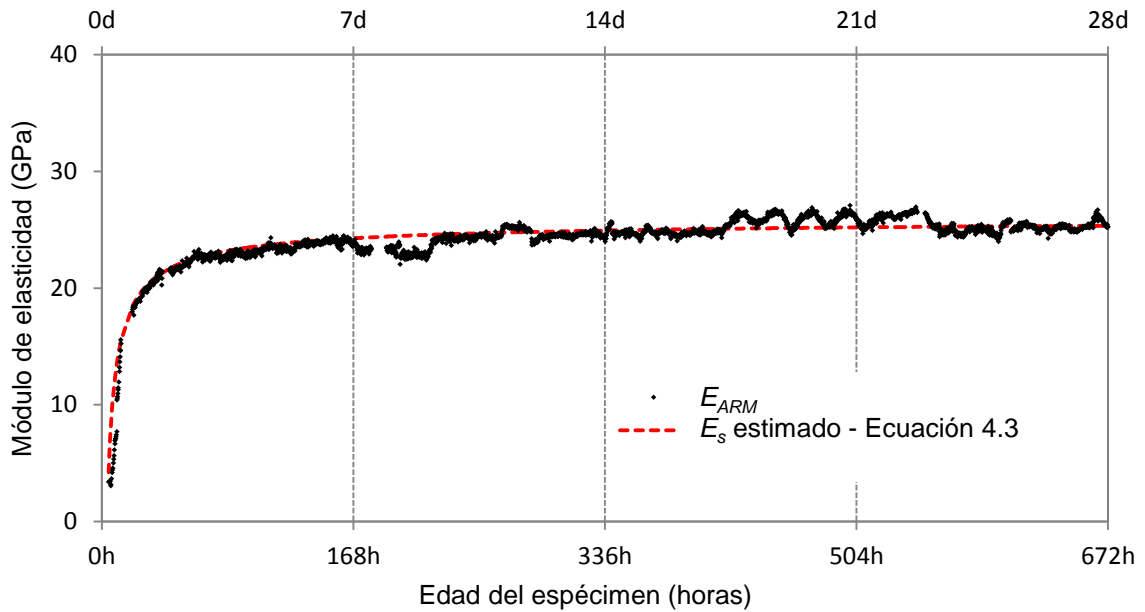


Figura 4.10. Análisis de desarrollo del módulo E_{ARM}

4.4.2 Análisis de la relación entre el E_d , E_{ARM} , E_{sec} , E_{tan-o} , E_{ch} , y f_c

La comparación entre todos los módulos de elasticidad calculados en la campaña experimental de esta investigación se muestran en la Figura 4.11.

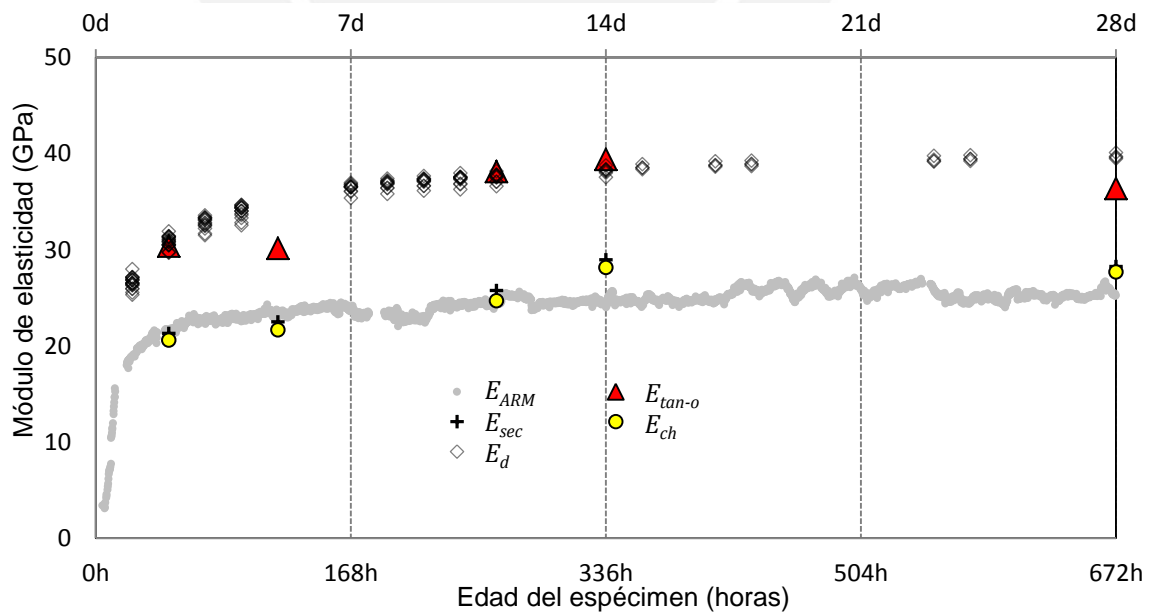


Figura 4.11. Edad de curado versus módulos E_d , E_{ARM} , E_{sec} , E_{tan-o} , y E_{ch}

Del gráfico anterior se observa lo siguiente:

- E_{ch} y el E_{sec} , poseen valores muy semejantes, solo difieren en un 3.2%.
- El módulo E_d (ASTM C215), es similar al módulo E_{tan-o} (obtenido haciendo uso de los primeros 200 puntos de la curva esfuerzo-deformación), siendo el error máximo obtenido entre ambos módulos igual 8.2% (para $t = 672$ horas) y el error mínimo menor al 1% (para $t = 336$ horas). Es correcto asumir entonces que ambos módulos son iguales y representan al módulo de elasticidad dinámico del concreto (E_d).
- El valor del módulo E_{ch} obtenido de acuerdo a la norma ASTM C469, es bastante similar al módulo obtenido mediante el EMM-ARM (E_{ARM}). El máximo error encontrado después de realizar la comparación fue del 10.7% (cuando $t = 336$ horas), mientras que el mínimo error calculado fue menor al 1%. En ese sentido, es válido asumir que E_{ch} es igual a E_{ARM} , y que ambos representan al módulo de elasticidad estático del concreto (E_s).

Gracias a la continua información obtenida del ensayo EMM-ARM y del ensayo de resonancia por impacto (ASTM C215), mostrado en la Figura 4.12a, se pudo analizar a detalle la relación que existe entre E_d y E_s en función al tiempo de curado.

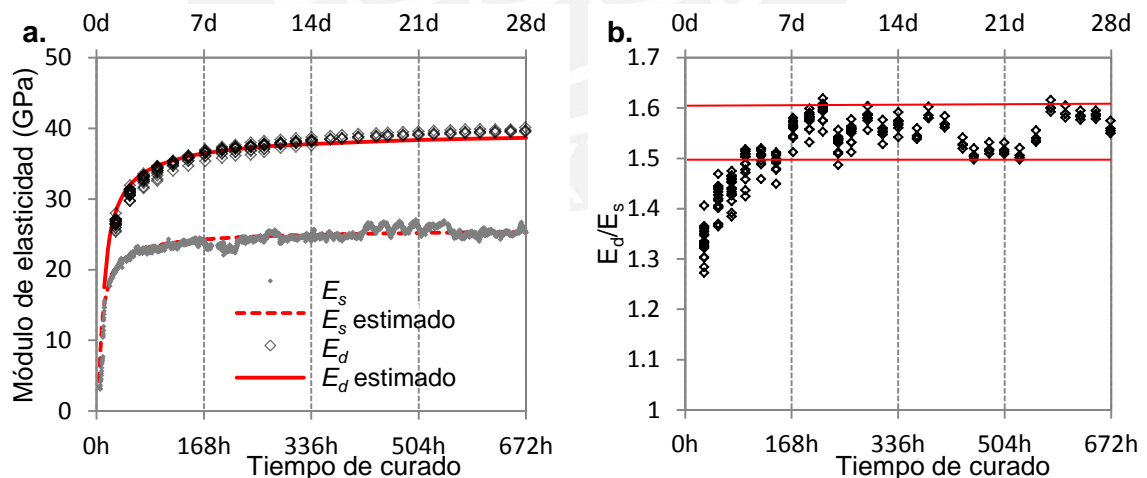


Figura 4.12. Relación entre el E_d y el E_s obtenidos experimentalmente (Aguilar et al., 2016)

En la Figura 4.12b se observa que durante los primeros días el valor de E_d/E_s varía entre 1.3 y 1.6. Sin embargo, cuando la edad de curado es mayor a los 7 días, la relación de E_d/E_s varía en un rango más pequeño de 1.5 a 1.6. Estos valores

concuerdan con Haach et al. (2013) donde se halló que E_d era 32% mayor a E_s , mientras que en Neville (1997) se muestra una relación de $E_s/E_d = 0.83$.

Adicionalmente, la resistencia a la compresión se evaluó en función E_s estimado con la Ecuación 4.3 y las correlaciones presentadas en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Ecuaciones predictivas de f_c en función de E_s .

Código	Expresión	
ACI 318 (1995)	$E_s = 4700 \sqrt{f_c} ; [MPa]$	Ecuación 4.4
Eurocode2 (2004)	$E_s = 22000 \left(\frac{f_c}{10}\right)^{1/3} ; [MPa]$	Ecuación 4.5
ABNT NBR 6118 (2004)	$E_s = 5600 \sqrt{f_c} ; [MPa]$	Ecuación 4.6

La Figura 4.13 muestra el valor de f_c obtenido al usar las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6 para E_s . Se puede notar que la expresión propuesta por el ACI 318 (1995), predice bastante bien la resistencia a la compresión en función del E_s , teniendo un error máximo de 19.5% y un error mínimo de 0.98%. En tanto, los resultados obtenidos acorde a ABNT NBR 6118 (2004) se encuentran subvalorados en un 28%. Finalmente, Eurocode2 (2004) subestima los datos de resistencia a la compresión en aproximadamente en un 50.3%.

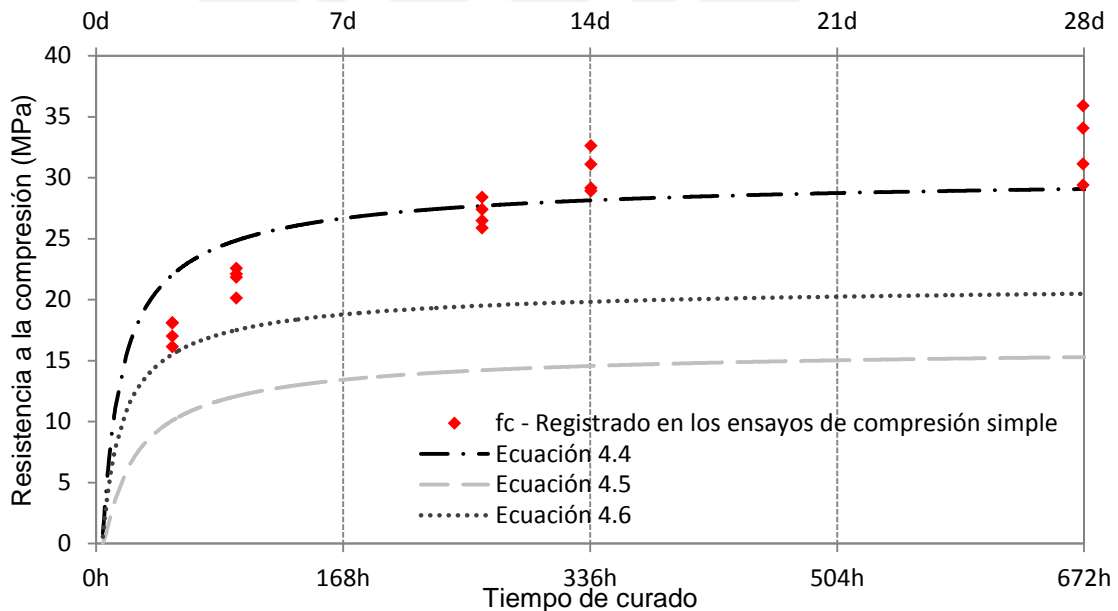


Figura 4.13. Desarrollo de la resistencia del concreto en el tiempo en función a diferentes expresiones predictivas.

4.5. Conclusiones

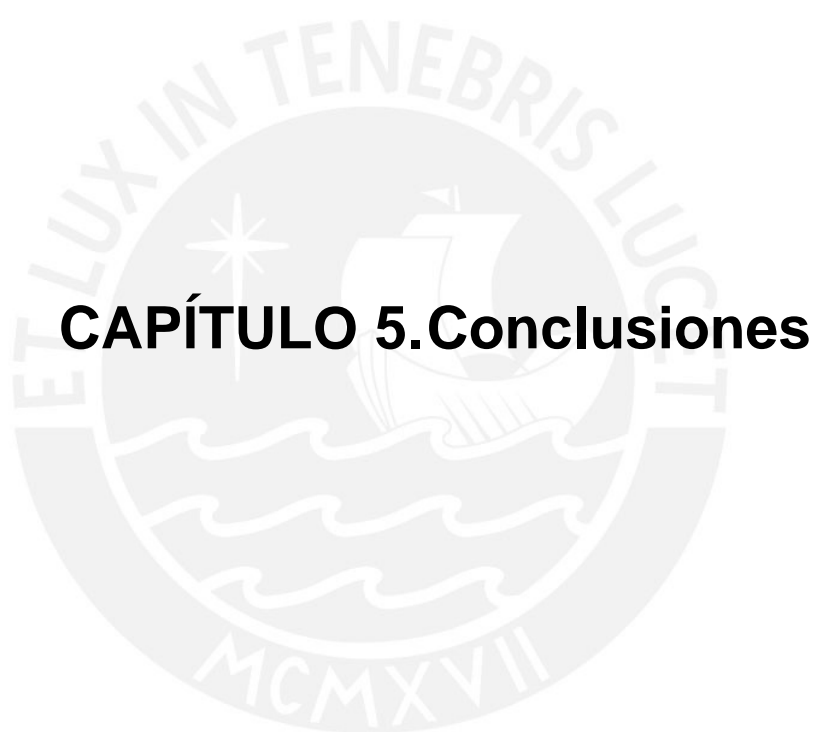
La evolución de la frecuencia de resonancia EMM-ARM puede ser estimada con precisión ($R^2 = 0.838$) mediante la Ecuación 4.2. Del mismo modo, la evolución en el tiempo del módulo elasticidad E_{ARM} , también pudo ser estimada adecuadamente ($R^2 = 0.808$) haciendo uso de la Ecuación 4.3. En el ensayo EMM-ARM (Figura 4.8) se observa falta de información en ciertas regiones de la curva, estas fueron producto de una pérdida de energía en el laboratorio. Sin embargo, este factor no altera ni afecta los resultados de la investigación, ya que la data y el desarrollo del E_{ARM} , se pueden estimar con precisión.

El módulo E_d concuerda con $E_{tan-\alpha}$, en ese sentido es válido asumir que para ensayos de carga rápida como impactos y sollicitaciones que impliquen deformaciones pequeñas, relacionadas a la parte inicial de la curva esfuerzo deformación, se puede utilizar el E_d (ASTM C215, 2008) para caracterizar mecánicamente el concreto.

El módulo de elasticidad E_{ARM} , se asemeja bastante bien al módulo E_{ch} (error máximo igual al 10.7%), además el método EMM-ARM proporciona información del concreto desde que este se encuentra en estado fresco y cuando aun no se han retirado los encofrados. Con este método se pudo evaluar la influencia del fraguado y el curado en la rigidez y resistencia del concreto. Los resultados obtenidos de E_{ARM} se usaron para predecir f_c mediante de formulaciones propuestas en otros códigos, encontrándose que ACI 318 (1995) fue la más precisa ya que contó con un error del 10%, ABNT NBR 6118 (2004) obtuvo un error del 28%, finalmente Eurocode2 (2004) obtuvo error de 53%.

Se encontró que la relación E_d/E_s no es constante en el tiempo, generalmente, su valor es menor a edades tempranas. Conforme el concreto empieza a ganar resistencia y rigidez, este valor aumenta y se estabiliza aproximadamente en 1.55.

La data obtenida mediante EMM-ARM es mayor en comparación con la data de los ensayos realizados tradicionalmente (ASTM C469, 2008). En caso se quiera evaluar la evolución del E_s de forma tradicional se necesitaría de una campaña experimental más extensa, costosa, y con resultados sujetos a más variaciones. Esto convierte al método EMM-ARM en una herramienta precisa, efectiva y económica para la caracterización mecánica del concreto.



CAPÍTULO 5. Conclusiones

5.1 Conclusiones

En esta investigación se contrastó algunos métodos destructivos y no destructivos de concreto. Los métodos destructivos tomados en cuenta fueron los de resistencia a la compresión (ASTM C39, 2012) y lectura del módulo de elasticidad (ASTM C469, 2010), en tanto los métodos no destructivos tomados en cuenta fueron el método de vibración por impacto (ASTM C215, 2008) y el método de EMM-ARM (Azenha et al, 2010).

Con el método de resonancia por impacto fue posible evaluar la evolución en el tiempo del módulo de elasticidad dinámico, resultado que se comparó con la resistencia a la compresión. Los resultados en especímenes con resistencia en el rango de 3 MPa y 50 MPa permitieron proponer una relación entre estas dos variables mediante un ajuste exponencial (Ecuación 3.6). Además, se pudo validar una propuesta de predicción de resistencia a la compresión en función a medidas tempranas del módulo de elasticidad dinámico. Esta validación muestra que es posible obtener aproximaciones de hasta 85% de precisión lo cual tendría aplicaciones interesantes si se complementa lo obtenido en esta investigación con un método para realizar inspecciones in/situ y control de la calidad en obra.

Por otro lado, se validó también el método EMM-ARM observándose que es posible obtener valores de módulo de elasticidad estático del concreto similares a los que se obtienen con el método tradicional de medición local de deformación en ensayos de compresión. Sin embargo, el método EMM-ARM provee información constante del endurecimiento del concreto, lo cual representa una herramienta útil para evaluar la influencia de aditivos o la inducción de otros materiales en la rigidez del concreto. Además, el método ha demostrado ser eficaz para estudiar la evolución de la rigidez desde edades muy tempranas, incluso cuando el concreto recién se fabrica.

Los resultados del estudio permitieron concluir que relación entre los módulos de elasticidad dinámico y estático no es constante en el tiempo. Conforme el concreto empieza a ganar resistencia y rigidez, este valor tiende a convertirse en una constante.

5.2 Trabajo futuro

La relación preliminar entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a la compresión propuesta en esta investigación, podría ser mejorada en futuros trabajos

en donde se incremente la base de datos y se subdividan los resultados en función de parámetros adicionales como diseños de mezcla, variando la relación agua/cemento, el tipo de cemento, los agregados, la edad o influencia de aditivos. Además sería recomendable someter las expresiones preliminares de esta investigación con resultados de campo (especímenes fabricados y curados en obra), viendo cómo influyen las condiciones de curado en los resultados y las estimaciones.

Este estudio podrá ser utilizado como antecedente en investigaciones que pretendan correlacionar la resistencia a la compresión o cualquier parámetro tradicional, con otras propiedades ligadas a métodos no destructivos. Por ejemplo se podría indagar más en el uso del georadar, *Bender Elements* o métodos ultrasónicos y su aplicabilidad como alternativas que garanticen la calidad del concreto en obra, de forma más rápida, eficiente y económica.



REFERENCIAS

Aguilar, R. (2010). Dynamic structural identification using Wireless Sensor Networks. Tesis doctoral, Universidad de Minho.

Aguilar, R., Ramirez, E., Haach, V., & Pando, M. (2016). Vibration-based nondestructive testing as a practical tool for rapid concrete quality control. *Construction and building materials*, 104, p181-191

American Concrete Institute C228. (2004). *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*.

American Society for Testing and Materials. (2002). C469-02: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson ratio of concrete in compression. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials. (2015). C293 / C293M - 15: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center Point Loading). Pensilvania.

American Society for Testing and Materials. (2015). C78 / C78M - 15: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading). Pensilvania.

American Society for Testing and Materials. (2005). C143 / C143M - 15: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Pensilvania.

American Society for Testing and Materials. (2007). C192 / C192M: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Pennsylvania.

American Society for Testing and Materials. (2008). C173 / C173M - 08: Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method. Pensilvania.

American Society for Testing and Materials. (2008). C215-08: Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. Pennsylvania.

American Society for Testing and Materials. (2009). C138/C138M: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.

American Society for Testing and Materials. (2011). C496/C496M - 11: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

American Society for Testing and Materials. (2012). C39/C39M - 12a: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia.

Architectural Institute of Japan. (1985). Standar for Structural Calculation of Reinforced Concrete Structures.

Azenha, M., Magalhães, F., Faria, R., & Cunha, Á. (2010). Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: a novel method based on ambient vibration. *Cement and Concrete Research*, 1096-1105.

Azenha, M., Ramos, L. F., Aguilar, R., & Granja, J. L. (2012). Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: A case study. *Cement and Concrete Composites*, 34(7), p881-890.

Bogas, J. A. (2012). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, 53(5), p962-972

Chacara, C. (2013). Evaluación estructural de construcciones históricas en la costa peruana utilizando tecnologías modernas: El caso del hotel "El Comercio" en Lima. Lima.

Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of computation*, 19(90), p297-301.

Eurocode2. (2004). Desing of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings.

Haach, V., Carrazedo, R., Oliveira, L., & Corrêa, M. (2013). Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. *NDT&E International*, 59, p18-24

Heinrichs, K. L., Liu, M. J., Darter, M. I., Carpenter, S. H., & Ioannides, A. M. (1989). Rigid pavement analysis and design. Final report. Phase I. FHWA-RD-88-068.

Kim, J., & Taha, M. R. (2014). Experimental and Numerical Evaluation of Direct Tension Test for Cylindrical Concrete Specimens. *Advances in Civil Engineering*.

Lai, W. L., Kou, S. C., Tsang, W. F., & Poon, C. S. (2009). Characterization of concrete properties from dielectric properties using ground penetrating radar. *Cement and Concrete Research*, 39(8), p687-695.

Lee, K. M., Kim, D. S., & Kim, J. S. (1997). Determination of dynamic Young's modulus of concrete at early ages by impact resonance test. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1(1), p11-18.

Neville, A. (1997). Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete. *ACI Materials Journal*, 94(1), p71-74.

Norma Brasileria . (2004). Projeto de Estructuras de Concreto - Procedimiento .

Raphael, J. M. (1984). Tensile strength of concrete Proceedings. *ACI Journal*, 81(2), p158-165.

Shirley, D. J., & Hampton, L. D. (1978). Shear-wave measurements in laboratory sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2), 607-613.

Tikalsky, P. J., Barry, E. S., & David, G. T. (2001). Using the concrete maturity meter for QA/QC. PA-2000-026+ 97-04 (22).

Valencia, G., & Ibarra, M. (2013). Estudio experimental para determinar patrones de correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en concreto simple. Lima.

Welch, P. D. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 15(2), 70-73.

Xiaobin, L., Qichen, S., Wei, F., & Juntao, T. (2013). Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*, 47, 231-239.

Zhu, J., & Kee, S. H. (2010). Monitoring early age microstructure development of cement paste using bender elements. SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics.

