

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Estimación del parámetro de densidadde microfisuras en el hormigón  
mediante ondas de esfuerzo tras exposición a alta temperatura**

**Iván Enrique Paredes Gómez**

**Ingeniería Civil**

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

Quito, 15 de mayo de 2020

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

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

**Estimación del parámetro de densidadde microfisuras en el hormigón  
mediante ondas de esfuerzo tras exposición a alta temperatura**

**Iván Enrique Paredes Gómez**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Juan José Recalde, Ph.D**

Quito, 15 de Mayo de 2020

## **DERECHOS DE AUTOR**

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

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Iván Enrique Paredes Gomez

Código: 00110888

Cédula de Identidad: 171956612-5

Lugar y fecha: Quito, Mayo de 2020

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

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

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

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

## RESUMEN

Es importante tener mecanismos para evaluar las estructuras de hormigón después de que estas sean afectadas por temperatura de fuego mayor a 400 grados centígrados o cargas dinámicas. En la actualidad tenemos métodos no destructivos y semidestructivos. De esta manera la estructura al evaluar no será sometida a más daño sino solo a métodos que no comprometan más a la estructura. De esta manera encontraremos las propiedades mecánicas del material y el parámetro de fisuras. La importancia de esta investigación es lograr el parámetro de densidad de fisuras en el hormigón mediante ondas de esfuerzo. El mismo que cuenta con tres losas por cada mezcla con un total de 3 mezclas y 9 losas. En esta investigación se obtuvo los parámetros de fisura después del daño mediante la evaluación de velocidad de corte, velocidad de pulso y número de rebote. Con los datos medidos con anterioridad de esta investigación lograron determinar los parámetros de fisura antes de exponerles a temperatura de 450 grados centígrados para la mezcla M3: 0.146 ; M4: 0.075 y M5: 0.102. , de tal forma que durante esta investigación se obtiene los parámetros de fisura de la mezcla M3 y M4.

Palabras claves: evaluación no destructiva, densidad de fisuras, velocidad de corte, velocidad de pulso, número de rebote, hormigón.

## ABSTRACT

It is important to have mechanisms to evaluate concrete structures after the structure is affected by fire temperatures greater than 400 degrees Celsius or dynamic loads. Currently, we have non-destructive and semi-destructive methods. This way, when evaluating the structure, it will not be subjected to more damage but only to methods that do not compromise or affect the structure. In this way we will find the mechanical properties of the material and the crack parameters. The importance of this research is to achieve the crack density parameter in concrete using stress waves. The same one that has three shells for each mix with a total of 3 mixes and 9 shells. In this investigation, the crack parameters were obtained after being damaged by evaluating cutting speed, pulse speed and rebound number. With the data previously measured from this investigation, it was capable to determine the crack parameters before exposing them to a temperature of 450 degrees Celsius. For the M3 mix: 0.146; M4: 0.075 and M5: 0.102, in such a way that during this investigation the crack parameters of the M3 and M4 mixture are obtained.

Key words: non-destructive evaluation, crack density, cutting speed, pulse speed, rebound number, concrete.

## ÍNDICE

1. <i>INTRODUCCIÓN</i> .....	11
1.1 Antecedentes.....	11
1.2 Justificación.....	11
1.3 Objetivos.....	12
1.4 Actividades a Realizar.....	12
1.5 Resultados Esperados.....	13
1.6 Definiciones.....	13
2. <i>DESARROLLO DEL TEMA</i> .....	15
2.1 Revisión teórica.....	15
2.1.1 Efecto de exposición a alta temperatura en el hormigón.....	15
2.1.2 Evaluación de estructuras de hormigón.....	16
2.1.3 Velocidad de pulso.....	16
2.1.4 Velocidad de corte.....	16
2.1.5 Modulo elasticidad dinámico.....	17
2.1.6 Modelo de O'Connell y Bundianski.....	17
2.2 Plan Experimental.....	21
2.2.1 Matriz Experimental.....	21
2.3 Metodología.....	23
2.3.1 Velocidad de Pulso.....	23
2.3.2 Velocidad Corte.....	23
2.3.3 Número de Rebote.....	24
2.3.4 Profundidad de Daño.....	24
2.3.5 Exposición Alta Temperatura.....	26
2.3.6 Métodos de Condicionamiento.....	26
2.4 Resultados.....	28
2.4.1 Resultados de ensayos en condiciones iniciales.....	28
2.4.2 Resultados preliminares tras exposición a altas temperaturas.....	29
2.4.3 Profundidad de daño.....	31
2.5 Análisis de Resultados.....	34
2.5.1 Módulo de elasticidad dinámico (Ed).....	34
2.5.2 Densidad de fisuras ( $\epsilon$ ).....	35
2.5.3 Resultados exposición a altas temperaturas.....	35
2.5.3.1 Módulo de elasticidad dinámico (Ed).....	35
2.5.3.2 Factibilidad para uso de ensayos no destructivos para determinar ( $\epsilon$ ).....	36
3. <i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i> .....	37
3.1 Conclusiones.....	37
3.2 Recomendaciones.....	38
4 <i>Referencias</i> .....	39

<i>Anexos A: Conticiones de las losas en condiciones dañadas, Dañadas Mojadas y Dañadas en Seco al Aire.....</i>	<i>40</i>
<i>Anexo B: Datos obtenidos en el laboratorio tras exposición a 450 °C.....</i>	<i>46</i>
<i>Anexo C: Datos obtenidos en el laboratorio ‘Saturado air dry’ .....</i>	<i>51</i>
<i>Anexo D: Datos obtenidos en el laboratorio ‘Seco al aire’ .....</i>	<i>56</i>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1 Ensayos realizados .....	21
Tabla No. 2: Pesos de las losas en condiciones de Seco al Aire en condiciones iniciales. ....	28
Tabla No. 3: Pesos de las losas en condiciones de mojado en condiciones iniciales. ....	28
Tabla No. 4: Pesos de las losas tras exposición a temperatura 450 °C. ....	29
Tabla No. 5: Resultados losas tras exposición a temperatura 450 °C. ....	29
Tabla No. 6: Pesos de las losas mojadas. ....	29
Tabla No. 7: Resultados losas en condiciones mojadas. ....	30
Tabla No. 8: Pesos losas Seco al Aire. ....	30
Tabla No. 9: Resultados losas Seco al Aire. ....	31
Tabla No. 10: Resultados de profundidad de daño Mezcla 3. ....	31
Tabla No. 11: Resultados de profundidad de daño Mezcla 4. ....	32
Tabla No. 12: Datos obtenido del modulo de elasticidad. ....	34
Tabla No. 13: Datos obtenido parámetro de fisuras. ....	35
Tabla No. 14: Datos modulo de elasticidad. ....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No 1: Propiedades elásticas de un sólido con fisuras circulares. ....	20
Figura No 2: Dimensión de losas. ....	21
Figura No 3: División de losa para puntos de medición.(Moreno.2018) .....	22
Figura No 4: Esquema velocidad de pulso ASTM C597-09.....	23
Figura No 5: Esquema velocidad de corte ASTM C215-08. ....	24
Figura No 6: Método de la profundidad de daño.(ACI 228.2R, 2013) .....	25
Figura No 7: Descripción de ejes para obtener la profundidad de daño.(Moreno. 2018) .....	25
Figura No 8: Termocupla.....	26
Figura No 9: Horno utilizado. ....	26
Figura No 10: Tanque de curado parcial. ....	27
Figura No 11: Tanque de curado completo.....	27
Figura No 12: Profundidad de daño M3, Losa 1 expuesta a temperatura de 450 °C. ....	32
Figura No 13: Profundidad de daño M3, Losa 1 Losa en condiciones Mojadas. ....	33
Figura No 14: Profundidad de daño M3, Losa 1 Losa en Secado Natural. ....	33
Figura No 15: Profundidad de daño M3, Losa 2 expuesta a temperatura de 450 °C. ....	40
Figura No 16: Profundidad de daño M3, Losa 2 Losa en condiciones Mojadas. ....	40
Figura No 17: Profundidad de daño M3, Losa 2 Losa en Secado Natural. ....	41
Figura No 18: Profundidad de daño M3, Losa 3 expuesta a temperatura de 450 °C. ....	41
Figura No 19: Profundidad de daño M3, Losa 3 Losa en condiciones Mojadas. ....	42
Figura No 20: Profundidad de daño M3, Losa 3 Losa en Secado Natural. ....	42
Figura No 21: Profundidad de daño M4, Losa 1 expuesta a temperatura de 450 °C. ....	43
Figura No 22: Profundidad de daño M4, Losa 1 Losa en condiciones Mojadas. ....	43
Figura No 23: Profundidad de daño M4, Losa 1 Losa en condiciones Mojadas. ....	43
Figura No 24: Profundidad de daño M4, Losa 2 expuesta a temperatura de 450 °C. ....	44
Figura No 25: Profundidad de daño M4, Losa 2 Losa en condiciones Mojadas. ....	44
Figura No 26: Profundidad de daño M4, Losa 1 Losa en condiciones Mojadas. ....	45

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Desde que empezaron a utilizar el hormigón hace cientos de años, se ha logrado construir desde una pequeña casa hasta rascacielos, puentes, hidroeléctricas. Que ha impactado y mejorado la calidad de vida de las personas. Siempre innovando métodos, o aprendiendo del simple prueba y error; hasta llegar a obtener dosificaciones muy precisas para obtener un hormigón de alta resistencia.

Mejorando el bienestar de la población cada año existen mejoras para alargar la vida útil de una estructura de hormigón, y con mas razón la seguridad de las estructuras hacia los seres vivos. De esta manera nos enfocaremos en el hormigón una vez que haya sido sometido en altas temperaturas. Con esto lograremos entender y visualizar el comportamiento del material ante una temperatura de 450 grados centígrados de temperatura.

Como referencia específica utilizaremos “la afectación del hormigón a altas temperaturas” (Recalde 2009). Con el fin de encontrar las microfisuras, y poder analizar en un periodo razonable de tiempo si el hormigón no a perdido su resistencia. Analizando si es factible seguir utilizando el mismo material o derrocar porque su estructura esta muy afectada.

### 1.2 Justificación

Nos enfocamos estandarizar un método que nos ayude a verificar y controlar. Que el material este en optima condición después de estar expuestos en altas temperaturas superiores a 450 °C. Debido a que cada día aumenta viviendas, bodegas, oficinas entre muchas

edificaciones, que son afectadas a temperaturas mayores a 300 °C por diferentes motivos que luego del daño puedan ser daños permanentes que no permitan la habitabilidad de personas en las edificaciones.

De esta manera podemos brindar satisfacción y seguridad al usuario. Una manera muy buena es realizar ensayos no destructivos con la finalidad de preservar lo que mas se pueda una estructura. El cual se propone encontrar la mejor estimación para evaluar eficiente mente las edificaciones.

### 1.3 Objetivos

Los objetivos planteados para este proyecto son:

- a) Aplicación de principios de transmisión de ondas de esfuerzo en medios poroelásticos para determinar el parámetro de densidad de fisura.
- b) Utilizar métodos de evaluación no-destructiva para cuantificar el daño en el hormigón tras exposición a alta temperatura.
- c) Analizar la factibilidad de poder cuantificar el parámetro de densidad de microfisuras en campo mediante ensayos de evaluación no-destructiva.

### 1.4 Actividades a Realizar

Las actividades planteadas para el siguiente proyecto son:

- Adecuación del equipamiento para exposición a altas temperaturas.
- Realizar los siguientes ensayos no destructivos:
  - Velocidad de pulso
  - Velocidad de Corte
  - Numero de Rebote
  - Profundidad de Daño

- Estimación del parámetro de densidad de fisuras de losas expuestas a alta temperatura.
- Análisis de resultados y factibilidad de cuantificar el parámetro de densidad de microfisuras en campo.

### 1.5 Resultados Esperados

Los resultados esperados para este proyecto son:

- a) Adecuación del equipo para exposición a alta temperatura.
- b) Resultados  $v_p, v_s$  y Numero de Rebote tras exposición en alta temperatura.
- c) Estimación del parámetro de densidad de fisuras de losas expuestas a altas temperaturas.
- d) Análisis de resultados y factibilidad de cuantificar el parámetro de densidad de microfisuras en campo.

### 1.6 Definiciones

En el desarrollo de los ensayos no destructivos que se realizo vamos a definir varios términos que se usaron y son de vital importancia su significado y su utilización adecuada.

Modulo de elasticidad:

El modulo de elasticidad representa la deformación unitaria y la fuerza que se aplica al material. Mediante esta relación podemos conocer la rigidez de nuestro material.

Velocidad de pulso:

Son ondas longitudinales que transmite de un transmisor a un receptor. El cual a nos muestra el tiempo de salida de un punta A hacia el punto B. Con el cual nos brinda información sobre como esta internamente nuestro material y poder conocer sus microfisuras internas.

Velocidad de Corte :

Son ondas transversales que transmite de un trasmisor a un receptor. De esta manera sabremos el tiempo que se demora de un punto a otro.

Numero de rebote:

Usando un esclerómetro usando correctamente brindaremos un estimación de la resistencia del hormigón, el cual a través de un golpe absorbe el impacto y se puede saber un valor cercano o de referencia para cualquier trabajo que se realice.

## **2. DESARROLLO DEL TEMA**

### 2.1 Revisión teórica

Al realizar una prueba no destructiva al material se consigue no afectar la estructura como tal, esto es de gran ayuda debido a que con varios métodos mostrados en las actividades a realizar podemos ver el estado de la estructura en sitio, con datos muy efectivos que nos permite ver el estado de nuestra estructura y las afectaciones que hubo. En nuestro estudio nos enfocaremos en los daños ocasionados en exposición del material simulando un a losa a temperaturas 450 °C.

#### **2.1.1 Efecto de exposición a alta temperatura en el hormigón**

Desde 1950 surgió la necesidad de construir edificaciones con una resistencia mayor a 50Mpa. Lo cual se necesitaba mejorar tanto los materiales, la dosificación, tipo de cemento, cantidad de agua y algún aditivo para que se logre llegar a una resistencia superior a 50Mpa. Comparando en la época lo común era una resistencia entre 10 a 12 Mpa. Con esto también se realizaron experimentos para que el material logre resistir mayor tiempo en temperaturas elevadas si se produce un incendio pero que no afecte la estructura como tal. Si analizamos hormigones a una temperatura de 200 °C sus propiedades no son afectadas he incluso puede seguir aumentando su resistencia. A lo contrario que si la temperatura sobrepasa los 400 °C Su mayor perdida en resistencia se registraron para temperaturas mayores a 400 °C (Chiang y Yang, 2005).

Esto también dependerá de una gran manera el tipo de agregado que se utilizo que será la razón principal que afecte a su resistencia. Como lo es con la piedra caliza que se ve menos afectada por sus propiedades que los agregados silíceos.

### 2.1.2 Evaluación de estructuras de hormigón

Podemos encontrar tres tipos de ensayos que se pueden realizar a una estructura para poder cuantificar el daño. Estos pueden ser los destructivos que son los que afectan directamente al estado físico de la estructura, los semidestructivos que se afecta parcialmente la estructura y los que se realizan en este ensayo que son los no destructivos los cuales no afectan ninguna propiedad física de la estructura como tal. A su vez en el ACI 318-14 cap.27 tenemos los métodos a seguir para obtener la resistencia del hormigón la cual debe ser realizada por personal capacitado para que no exista error en las mediciones por realizar mal el procedimiento.

### 2.1.3 Velocidad de pulso

Este ensayo se considera no destructivo debido a que mediante propagación de la onda P. Las cuales transmiten a tensión y compresión longitudinalmente en un medio sólido. A su vez se puede estimar las propiedades elásticas con el fin de encontrar la calidad del material. También puede haber dispersión de la onda por el material heterogéneo. Todo esto está normado en ASTM C597 –Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Con el cual nos especifica como se realizará correctamente el ensayo. Donde la ecuación a continuación nos da la velocidad de pulso a través del módulo de elasticidad dinámico, módulo de Poisson y la densidad del hormigón.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu) * (1 - 2\mu)}}$$

### 2.1.4 Velocidad de corte

Este ensayo nos permite atravesar de las ondas S que viajan de forma transversal por lo que estas ondas son de corte las cuales son medidas en medios sólidos. El cual se calcula a



través del tiempo y la distancia que se demora en llegar la onda de un punto inicial al punto final. La Norma ASTM E1316, “Standard Terminology for Nondestructive Examinations” no menciona que puede existir varios factores que determinan la velocidad de corte que son el tiempo, impulso y la distancia a medir.

Se usara la ecuación a continuación para la velocidad de corte a través del módulo de elasticidad dinámico, modulo de Poisson y la densidad del hormigón.

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d(1 - \mu)}{2\rho(1 + \mu)}}$$

### 2.1.5 Modulo elasticidad dinámico

Este ensayo nos permite obtener el daño del hormigón a través de los esfuerzos unitarios con las deformaciones unitarias. Podemos determinar mediante la prolongación de frecuencias a través de nuestro muestra en nuestro caso una losa de hormigón. De esta manera existen dos formas de realizar mediante resistencia forzada o resonancia de impacto. (Norma ASTM C215). Se encuentra a través de la siguiente ecuación , donde debemos tener la velocidad de pulso, velocidad de corte y densidad del hormigón.

$$Ed = \rho \left[ \frac{vs^2(3vp^2 - 4vs^2)}{(vp^2 - vs^2)} \right]$$

### 2.1.6 Modelo de O’Connell y Bundianski

Recalde (2009), investigo la densidad de fisura del hormigón encontrar el daño tras la exposición a una temperatura de 300 °C interno mediante el modelo de O’Connell y Bundianski. Este modelo que fue desarrollado en 1974, nos permite encontrar un aproximado de la densidad de fisura del hormigón, el cual son planas circulares o elipsoidales distribuidas diferentes. Que se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{V}\right) \sum a^3$$

$$\varepsilon = \left(2N / \pi V\right) \sum \frac{A^2 c}{Pc}$$

donde:

$V(m^3)$  = volumen del sólido.

$a (m)$  = radio circular mayor.

$N$  = número de fisuras.

$Ac (m^2)$  = Área de Fisuras.

$Pc (m)$  = Perímetro de las fisuras.

Este modelo también describe el cambios de medulo de compresibilidad ( $k$ ), modulo de corte ( $G$ ), relación de Poisson ( $\nu$ ) y modulo de Young ( $E$ ). El cual podemos el parámetro de densidad de grietas ( $\varepsilon$ ). Como muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{k}{k_0} = 1 - \left[ \frac{16(1-\nu^2)}{9(1-2\nu)} \right] D \varepsilon$$

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

$$\frac{G}{G_0} = 1 - \frac{32}{45} (1 - \nu) \left[ D + \frac{3}{(2-\nu)} \right] \varepsilon$$

$$\varepsilon = \left[ \frac{32}{45} * \frac{\nu_0 - \nu^2}{1 - \nu^2} * \frac{2 - \nu}{(D(1 + 3\nu_0)(2 - \nu) - 2(1 - \nu_0))} \right]$$

Donde:

$\nu$  = módulo de Poisson efectivo.

$\nu_0$  = módulo de Poisson del sólido no fisurado.

$k$  (Pa) = módulo de compresibilidad efectivo.

$k_0$  (Pa) = módulo de compresibilidad del sólido no fisurado.

$G$  (Pa) = módulo de cortante efectivo.

$G_0$  (Pa) = módulo de cortante del sólido no fisurado.

También depende del grado de saturación este puede ser parcial o totalmente.

Saturación Parcial:

$$D_{ps} = 1 - \xi_{OB}$$

Donde:

$\xi_{OB}$  (Pa) = grado de saturación de fisuras

$K_{fl}$  = módulo de compresibilidad del fluido

$a$  (m) = radio circular mayor.

$c$  (m) = grosor de fisura.

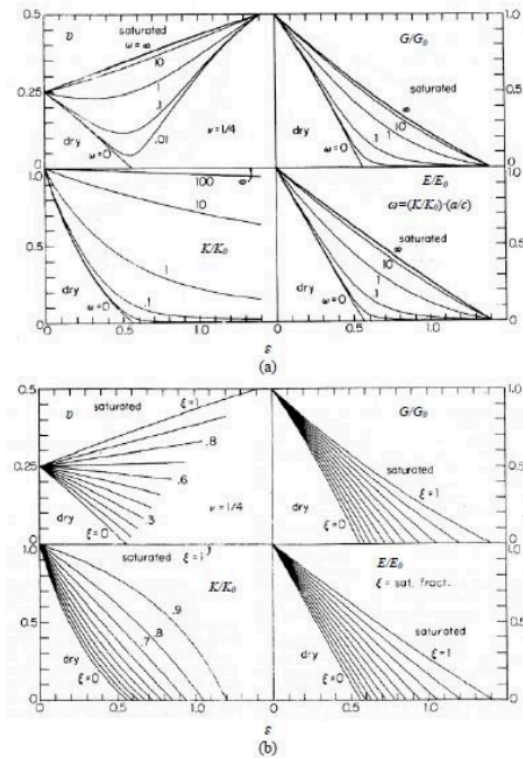


Figura No 1: Propiedades elásticas de un sólido con fisuras circulares.

(a) Efecto de saturación total (b) Efecto de saturación parcial.  
Fuente: O'Connell y Budianski, (1974)

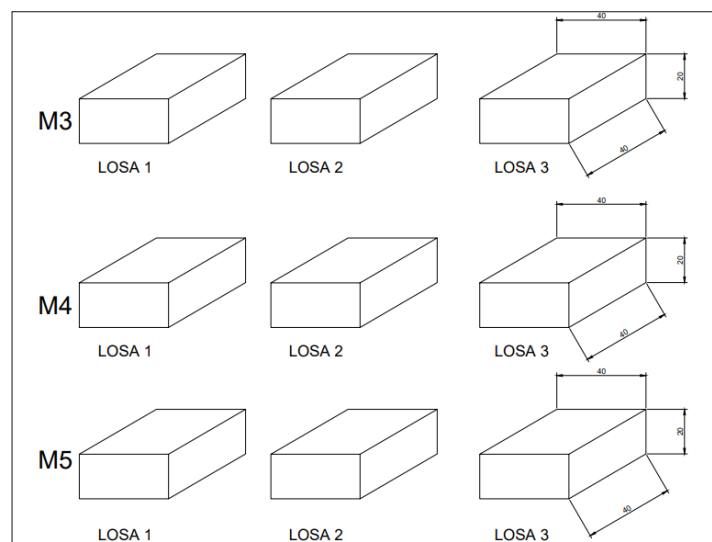
## 2.2 Plan Experimental

### 2.2.1 Matriz Experimental

En el presente trabajo de investigación se continuara con el trabajo de Andrea Moreno (2018) en el cual consta de 9 losas las cuales son de 200x 400 x200 milímetros. Las cuales conforman tres mezclas diferentes. M3 con una relación agua/cemento de 0,35; M4 con una relación agua/cemento de 0,45; M5 con una relación agua/cemento de 0,60.

*Tabla No. 1 Ensayos realizados*

Mezcla	Losa	Durante la exposición a 450°C			Después de la exposición a 450°C			
		Velocidad de Pulso (Vp)	Velocidad de Corte (Vs)	Número de Rebote (NR)	Velocidad de Pulso (Vp)	Velocidad de Corte (Vs)	Número de Rebote (NR)	Profundidad de daño (D)
M3	1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
M4	1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	3	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M
M5	1	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M
	2	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M
	3	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M	A.M



*Figura No 2: Dimensión de losas. (Moreno 2018)*

Todas las losas se dividieron de tal forma que se pudiera obtener las mediciones en los mismo puntos en todas las losas, con un total de 10 puntos. Como se muestra en la grafica a continuación.

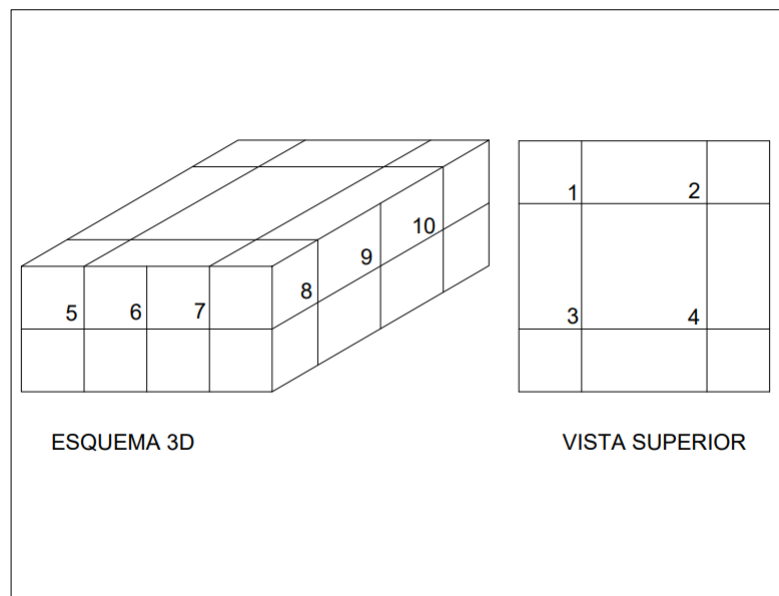


Figura No 3: División de losa para puntos de medición. (Moreno.2018)

## 2.3 Metodología

### 2.3.1 Velocidad de Pulso

Para medir la velocidad de Pulso se procedió a medir los diez puntos en la cual nosotros identificamos en nuestras losas como se muestra el grafico 3. El cual es una onda de propagación que se considera un ensayo no destructivo, el mismo que transmite a tensión y compresión longitudinalmente. El cual se baso en la ASTM C597 – ( Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete) para realizar el ensayo.

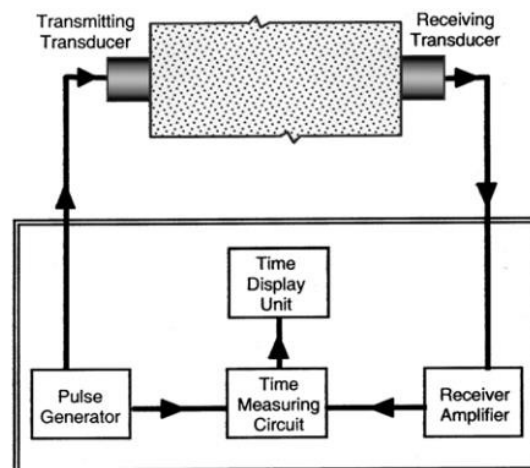


Figura No 4: Esquema velocidad de pulso ASTM C597-09.

### 2.3.2 Velocidad Corte

Para medir la velocidad de corte se procedió de la misma manera que la velocidad de pulso, se miden los diez puntos en la cual nosotros identificamos en nuestras losas como se muestra el grafico 3. La diferencia es que se utiliza un oscilador de frecuencia y unos transductores para que envíe la señal y reciba la señal. Se puede decir que viaja de un punto A hasta el punto B. con un generador de impulso. Como se observa en la figura 2.

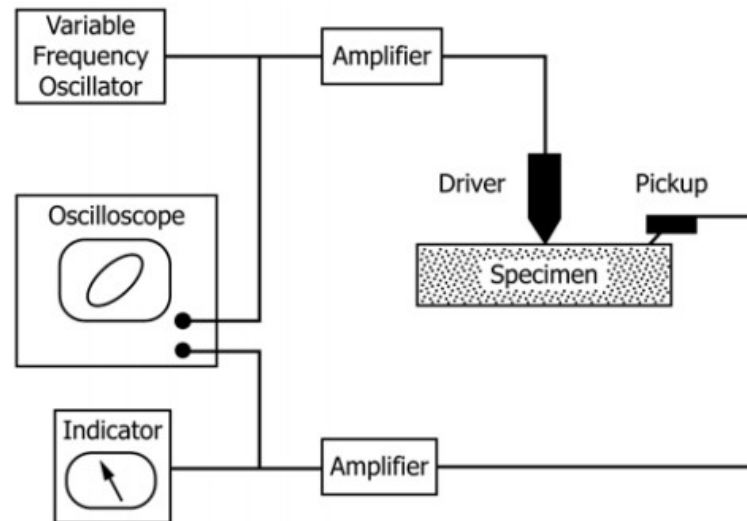


Figura No 5: Esquema velocidad de corte ASTM C215-08.

### 2.3.3 Número de Rebote

El número de rebote se obtiene a través de un esclerómetro Schmidt PCE-HT, el cual a través de un impacto a través de un resorte estima la resistencia del hormigón. El cual se procedió a medir 3 veces por cara para obtener un promedio por cara. El cual se usó la norma ASTM C805-02.

### 2.3.4 Profundidad de Daño

Este ensayo viaja de un punto T hacia el punto R como lo muestra en la figura 6. La cual se denomina Path 1, la cual viaja a través del daño, que muestra que el tiempo de viaje es más corto debido a que es la línea recta. Mientras que la segunda señal denominada Path 2, viaja a través del hormigón dañado. El cual su transcurso de tiempo es mayor ya que se desvía para llegar al hormigón dañado y regresa a su punto R.



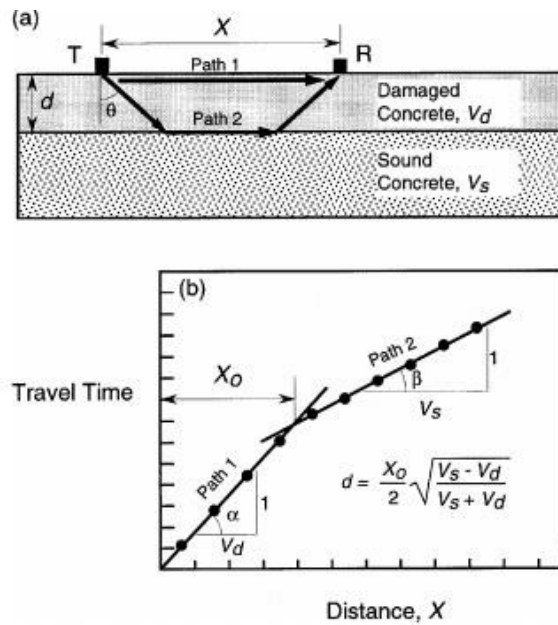


Figura No 6: Método de la profundidad de daño. (ACI 228.2R, 2013)

En el ensayo realizado en el laboratorio la losa se dividió en ejes. Esa cara de la losa será la misma que esta en contacto con la parte inferior del horno. La cual se grafico el eje A-A y B-B. El mismo que dependía únicamente de la distancia, debido a que el único que cambiaba de posición es el receptor. Como muestra en la figura 7.

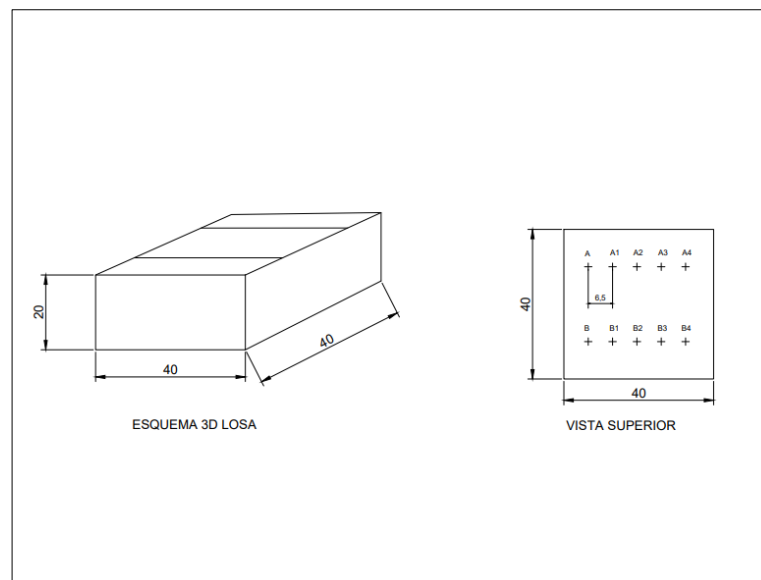


Figura No 7: Descripción de ejes para obtener la profundidad de daño. (Moreno, 2018)

### 2.3.5 Exposición Alta Temperatura

En la adecuación y preparación del equipo se realizó un horno no industrial en las instalaciones de la Usfq. El objetivo fue mantener una temperatura constante de  $450^{\circ}\text{C} \pm 25$  continuos durante 2 horas. El horno fue creado con ladrillo de cerámica refractario el cual en su base, y colocado una plancha metálica rectangular para que puede brindar una temperatura homogénea a toda la losa. La cual fue revestida con lana de vidrio para aislara el calor y se colocó una capa de ladrillos para que se pueda mantener la temperatura. También se colocó una termocupla en la placa metálica que se colocó en la base para que nos diera la temperatura lo mas precisa posible. La temperatura era transmitida a un ardidito que fue diseñado para que nos indique la temperatura en cada comento.



*Figura No 9: Horno utilizado.*



*Figura No 8: Termocupla*

### 2.3.6 Métodos de Condicionamiento

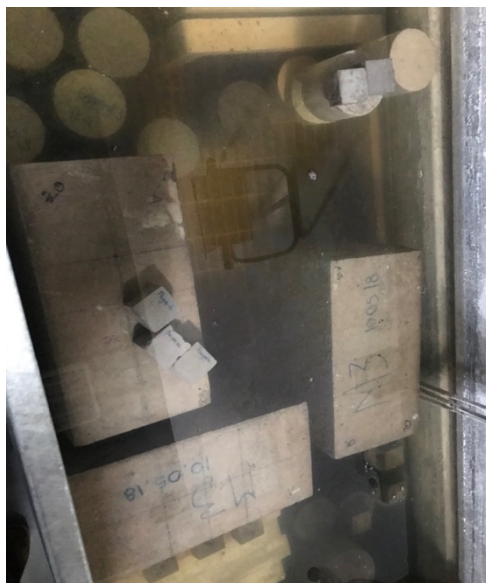
Existieron dos condicionamientos que se utilizaron en este ensayo. El primero fue en condición al agua. El cual las losas fueron colocadas en tanques que permitían que este en contacto con el agua todas las caras menos una. Esto es para que en el transcurso de 48 horas

pueda liberar el aire que se encontraba en la losa. Después de las 48 horas se sumergen completamente las losas en el agua durante 120 horas o 5 días.

Mientras que el segundo método realizado fue con condición Seco al Aire. Las cuales luego de ser extraídas de los tanques de agua se colocaron en el laboratorio secándose durante 11 días. Debido a que son días estimados para que la losa alcance su peso estable.



*Figura No 10: Tanque de curado parcial.*



*Figura No 11: Tanque de curado completo.*

## 2.4 Resultados

### 2.4.1 Resultados de ensayos en condiciones iniciales

Se obtuvo los siguientes pesos en cada una de las mezclas, la cual son tres: Seco al Aire, Mojada la losa.

*Tabla No. 2: Pesos de las losas en condiciones de Seco al Aire en condiciones iniciales. (Moreno.2018)*

Mezcla	No. De Losa	Peso final [kg]
M3	1	76,8
	2	76,6
	3	76,7
M4	1	74,7
	2	74,0
	3	74,9
M5	1	75,7
	2	75,8
	3	75,7

*Tabla No. 3: Pesos de las losas en condiciones de mojado en condiciones iniciales. (Moreno.2018)*

Mezcla	No. De Losa	Peso final [kg]
M3	1	81,0
	2	80,6
	3	80,2
M4	1	77,7
	2	78,7
	3	77,9
M5	1	77,6
	2	77,5
	3	77,5

## 2.4.2 Resultados preliminares tras exposición a altas temperaturas

Tabla No. 4: Pesos de losas tras exposición a temperatura 450 °C.

Mezcla	No. De Losa	Peso final [kg]
m3	1	75.7
	2	75.6
	3	76
m4	1	75
	2	74.6

Se obtuvieron los siguientes resultados de Numero de Rebote, Velocidad de Pulso y Velocidad de Corte. Tras exposición a temperaturas de 450 °C, el cual es un promedio de tres valores obtenidos en el laboratorio de igual manera se encuentra todos los datos en Anexos B.

Tabla No. 5: Resultados losas tras exposición a temperatura 450 °C.

Mezcla	No. De Losa	Número de Rebote	Vp [m/s]	Vs [m/s]
M3	1	50	4041	2857
	2	50	4186	2778
	3	49	4079	-
M4	1	48	3531	2939
	2	49	3996	2815

Pesos de las mezclas en condiciones mojadas.

Tabla No. 6: Pesos de las losas mojadas.

Mezcla	No. De Losa	Peso final [kg]
m3	1	78.8
	2	77.5
	3	79.2
m4	1	78,6
	2	76.3

Se obtuvieron los siguientes resultados de Numero de Rebote, Velocidad de Pulso y Velocidad de Corte. En condiciones mojadas, el cual es un promedio de tres valores obtenidos en el laboratorio de igual manera se encuentra todos los datos en Anexos.

*Tabla No. 7: Resultados losas en condiciones mojadas.*

Mezcla	No. De Losa	Número de Rebote	Vp [m/s]	Vs [m/s]
M3	1	50	4184	2500
	2	50	4158	2601
	3	50	4125	2891
M4	1	49	3756	2022
	2	47	3737	2599

Por ultimo se obtuvo los datos Seco al aire con los siguientes pesos.

*Tabla No. 8: Pesos losas Seco al Aire.*

Mezcla	No. De Losa	Peso final [kg]
m3	1	77.5
	2	77.1
	3	77.5
m4	1	74.7
	2	77.2

De igual manera se obtuvieron los siguientes resultados de Numero de Rebote, Velocidad de Pulso y Velocidad de Corte. En condiciones seco al aire, el cual es un promedio de tres valores obtenidos en el laboratorio de igual manera se encuentra todos los datos en Anexos.

Tabla No. 9: Resultados losas Seco al Aire.

Mezcla	No. De Losa	Número de Rebote	Vp [m/s]	Vs [m/s]
M3	1	50	4167	2468
	2	49	4257	2324
	3	50	4169	2436
M4	1	48	3802	2128
	2	47	4006	2253

### 2.4.3 Profundidad de daño

Los resultados del tiempo en Micro segundos a través de la onda de superficie dañada o área de contacto directo con la placa metálica del horno.

### Mezcla 3

Tabla No. 10: Resultados de profundidad de daño Mezcla 3.

Mezcla	No. De Losa	Punto	Distancia [cm]	Tiempo [microsegundos] Quemada	Tiempo [microsegundos] Mojada	Tiempo [microsegundos] Seca al Aire
M3	1	A-A1	6.50	24	21	30.3
		A-A2	13.00	50	31	45.1
		A-A3	19.50	68	45	60.8
		A-A4	26.00	88	78	80.0
		B-B1	6.50	30	23	8.9
		B-B2	13.00	43	27	44.9
		B-B3	19.50	71	46	52.8
		B-B4	26.00	78	76	80.0
	2	A-A1	6.50	25	11	22.7
		A-A2	13.00	46	37	44.3
		A-A3	19.50	72	47	66.8
		A-A4	26.00	85	68	81.7
		B-B1	6.50	23	11	10.5
		B-B2	13.00	45	37	40.7
		B-B3	19.50	71	50	59.5
		B-B4	26.00	83	61	81.2
	3	A-A1	6.50	22	21	33.2
		A-A2	13.00	49	37	46.6
		A-A3	19.50	64	55	58.9
		A-A4	26.00	88	72	72.6
		B-B1	6.50	30	12	12.9
		B-B2	13.00	56	25	42.1
		B-B3	19.50	72	44	51.8
		B-B4	26.00	90	81	74.7

## Mezcla 4

Tabla No. 11: Resultados de profundidad de daño Mezcla 4.

Mezcla	No. De Losa	Punto	Distancia [cm]	Tiempo [microsegundos] Quemada	Tiempo [microsegundos] Mojada	Tiempo [microsegundos] Seca al Aire
M4	1	A-A1	6.50	28	13	10.1
		A-A2	13.00	63	32	52.9
		A-A3	19.50	86	51	73.8
		A-A4	26.00	104	83	80.5
		B-B1	6.50	26	22	15.5
		B-B2	13.00	89	36	40.2
		B-B3	19.50	101	51	65.8
		B-B4	26.00	118	86	89.6
	2	A-A1	6.50	21	9	12.0
		A-A2	13.00	49	26	30.8
		A-A3	19.50	76	44	57.3
		A-A4	26.00	120	62	80.7
		B-B1	6.50	23	9	16.2
		B-B2	13.00	55	26	38.6
		B-B3	19.50	84	44	57.1
		B-B4	26.00	117	62	90.5

Con todos los datos obtenidos de la del tiempo de microsegundos y la distancia entre ejes se grafico los mismo obteniendo las siguientes graficas. Las cuales son de la Mezcla 3, en los anexos se observan todas las tablas y gráficos de cada mezcla.

## Mezcla 3

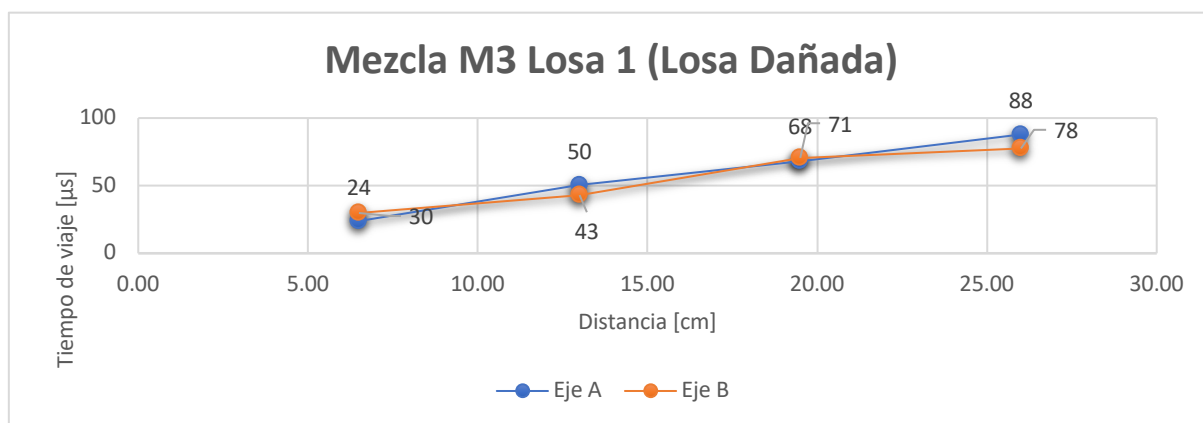


Figura No 12: Profundidad de daño M3, Losa 1 expuesta a temperatura de 450 °C.



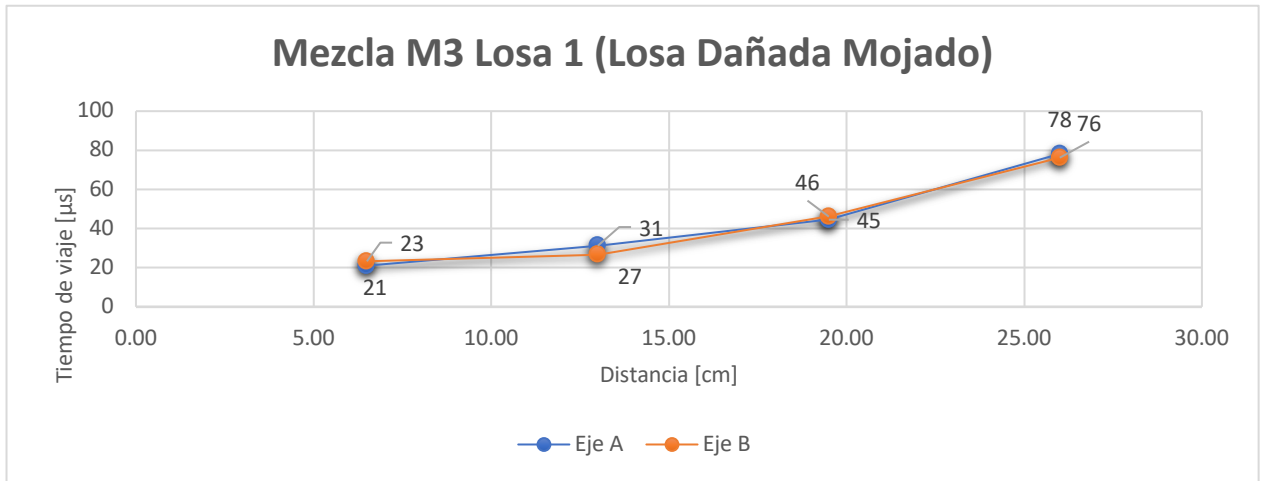


Figura No 13: Profundidad de daño M3, Losa 1 Losa en condiciones Mojadas.

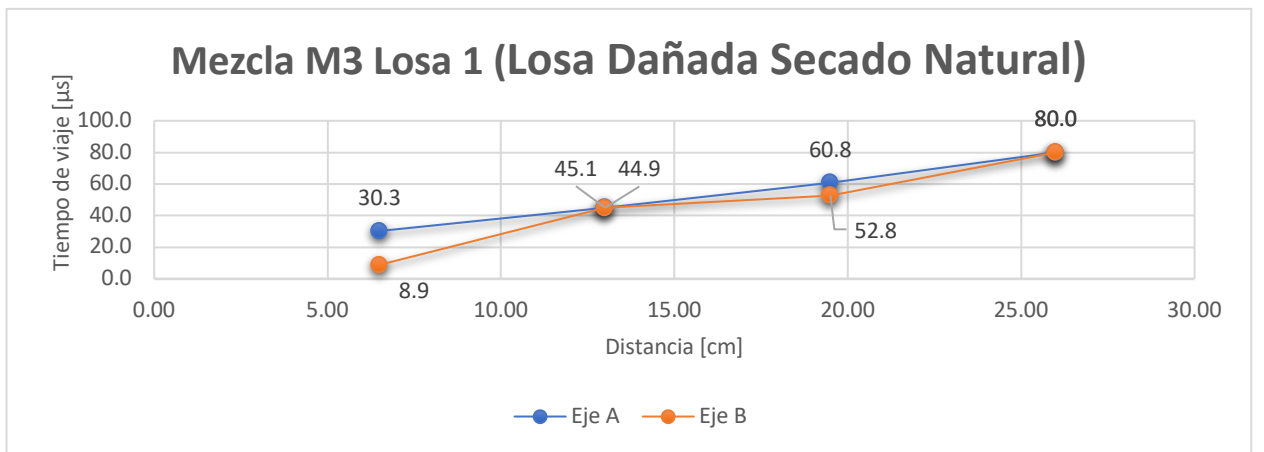


Figura No 14: Profundidad de daño M3, Losa 1 Losa en Secado Natural.

## 2.5 Análisis de Resultados

### 2.5.1 Módulo de elasticidad dinámico (Ed)

Para obtener el modulo de elasticidad dinámico obtenemos de la ecuación a continuación que relaciona la velocidad de corte y la velocidad de pulso obtenida en el ensayo.

$$Ed_{(Vs,Vp)} = \rho X \frac{(Vs^2) \times (3Vp^2 + Vs^2)}{Vp^2 Vs^2}$$

Donde:

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)= densidad del hormigón

$V_s$  (m/s)=Velocidad de corte

$V_p$  (m/s)=Velocidad de pulso

Datos de modulo elastico dnamico obtenidos en conciciones iniciales sin daño.

Tabla No. 12: Datos obtenido del modulo de elasticidad.(Moreno. 2018)

Mezcla	No. De Losa	Ed Seco al Aire [GPa]	Ed Mojado [GPa]
M 3	1	33,6	40,0
	2	32,1	38,1
	3	32,3	38,3
M 4	1	28,2	29,7
	2	27,6	30,8
	3	27,2	30,1
M 5	1	29,1	29,4
	2	28,5	29,8
	3	29,1	31,8

### 2.5.2 Densidad de fisuras ( $\epsilon$ )

Para obtener la densidad de fisuras con la velocidad de corte y de pulso que fue medido en cada losa. De tal forma se encontró dos parámetros de fisura uno de cada losa y otra por las 3 mezclas del proyecto. Esto datos fueron obtenidos antes de realizar el ensayo.

Tabla No. 13: Datos obtenido parámetro de fisuras.(Moreno. 2018)

No. De Mezcla	No. De Losa	Parámetro de densidad de fisuras por losa	Parámetro de densidad de fisuras por mezcla
M3	1	0,125	0,146
	2	0,168	
	3	0,146	
M4	1	0,050	0,075
	2	0,098	
	3	0,076	
M5	1	0,109	0,102
	2	0,095	
	3	0,102	

### 2.5.3 Resultados exposición a altas temperaturas

#### 2.5.3.1 Módulo de elasticidad dinámico (Ed)

Para obtener el módulo de elasticidad dinámico con la velocidad de corte y velocidad de pulso . se realizara para las losas tras exposición a altas temperaturas, en estado mojado y Seco al Aire.

Tabla No. 14: Datos modulo de elasticidad.

Ensayos Después al Daño	Mezcla	No. De Losa	Ed Mojado [GPa]	Ed Air Dry [GPa]
	m4	1	24.6	28.4
		2	35.5	33.5
	M3	1	36.9	37.2
		2	39.5	38.9
		3	-	-

### 2.5.3.2 Factibilidad para uso de ensayos no destructivos para determinar ( $\epsilon$ )

En la investigación de los datos obtenido se observa que el modulo de elasticidad Mojado no siempre es mayor el valor al de modulo de elasticidad en Air Dry. Lo cual nos impide obtener el valor de microfisura. Esto es debido a que luego de exponer en altas temperaturas las ondas no reflejan datos concisos.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Conclusiones

Del presente proyecto se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- a) Se obtuvieron los datos de velocidad de corte, velocidad de pulso y número de revote después del daño.
- b) Losas analizadas mezcla M3 losa 1, 2, 3. Mezcla M4 losa 1, 2.
- c) En la mezcla M3 tras exposición su velocidad de pulso es de 4156 (m/s), para condición mojada es de 4199 (m/s) y para seco al aire de 4102 (m/s).
- d) En la mezcla M4 tras exposición su velocidad de pulso es de 2409 (m/s), para condición mojada es de 2664 (m/s) y para seco al aire de 2817 (m/s).
- e) En la mezcla M3-1 tras exposición su módulo de elasticidad es de 34 (Gpa), para condición mojada es de 37 (Gpa) y para seco al aire de 37 (Gpa).
- f) En la mezcla M3-2 tras exposición su módulo de elasticidad es de 31 (Gpa), para condición mojada es de 39 (Gpa) y para seco al aire de 38 (Gpa).
- g) En la mezcla M3-3 tras exposición su módulo de elasticidad es de 33 (Gpa), para condición mojada es de 42 (Gpa).
- h) En la mezcla M4-1 tras exposición su módulo de elasticidad es de 24 (Gpa), para condición mojada es de 25 (Gpa) y para seco al aire de 28 (Gpa).
- i) En la mezcla M4-2 tras exposición su módulo de elasticidad es de 26 (Gpa), para condición mojada es de 35 (Gpa) y para seco al aire de 33 (Gpa).
- j) Parámetro de fisuras para la M3 fue de 0.015 y M4 de 0.112.

### 3.2 Recomendaciones

Con desarrollo de este proyecto se recomienda lo siguiente para futuras investigaciones:

- a) Se recomienda que los transductores no sean tan rígidos debido a que al no tener 100 de contacto con la superficie puede generar valores erróneos.
- b) Tratar de lubricar bien los transductores debido a que ayuda con para obtener mejor área de contacto.
- c) Mejorar el horno de tal manera que este no tenga tantas fugas de aire, para optimizar y asimilar mas a la realidad de una estructura sometida a estas condiciones.
- d) Tener mucho cuidado con los datos que te reflejan los equipos y las unidades en las que se encuentran.
- e) Aumentar una medición mas para tener un promedio con 4 valores.

#### 4 Referencias

Recalde, J. J. (2009). *Estimating Crack Growth in Temperature Damaged Concrete*. Raleigh: North Carolina State University

Moreno, A. (2018). *Estimación del parámetro de densidad de microfisuras en el hormigón mediante ondas de esfuerzo*. Universidad San Francisco de Quito.

Budiansky, B., & O'Connell, R. J. (1974). *Seismic Velocities in Dry and Saturated Cracked Solids*. Journal of Geophysical Research, 79(36), 5412-5426

ASTM C597-09. (2009). ASTM International. *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, 1–4. Recuperado de <https://www.astm.org/>

ACI Committee 228, "228.2R-13 *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*" American Concrete Institute, Farmington Hills, MI,

Chung, H.W. and K.S, Law, (1985), *Diagnosing In Situ Concrete by Ultrasonic Pulse Technique*, Concrete International, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, pp 42-49.

Segovia, M. D., Carrasco, M. F., Miretti, R. E., Ulibarrie, N., Defagot, C., & Puga, R. (2007). Aplicación de ensayos no destructivos en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión. In *IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires*.

**Anexos A: Conticiones de las losas en condiciones dañadas, Dañadas Mojadas y Dañadas en Seco al Aire.**

**Mezcla 3 Losa 2**

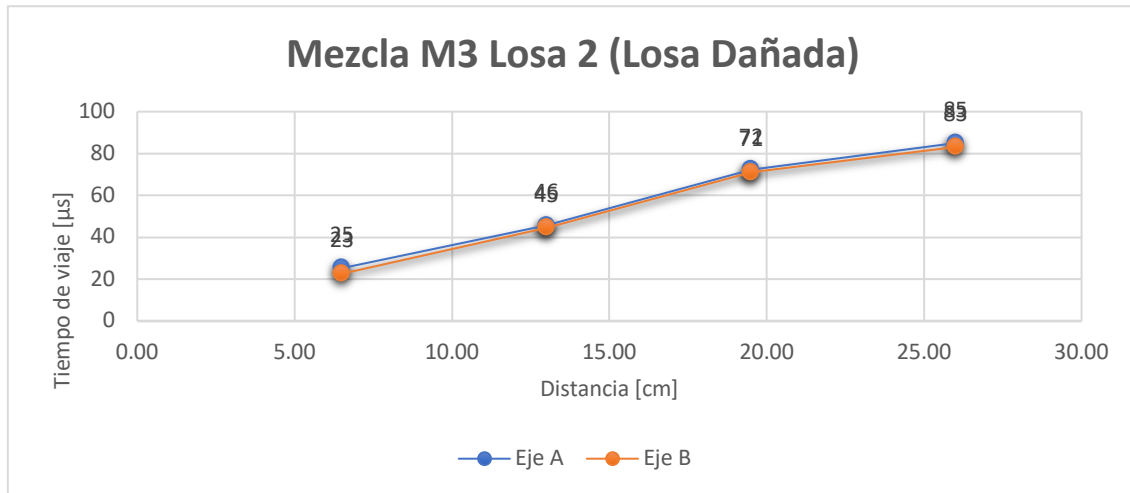


Figura No 15: Profundidad de daño M3, Losa 2 expuesta a temperatura de 450 °C.

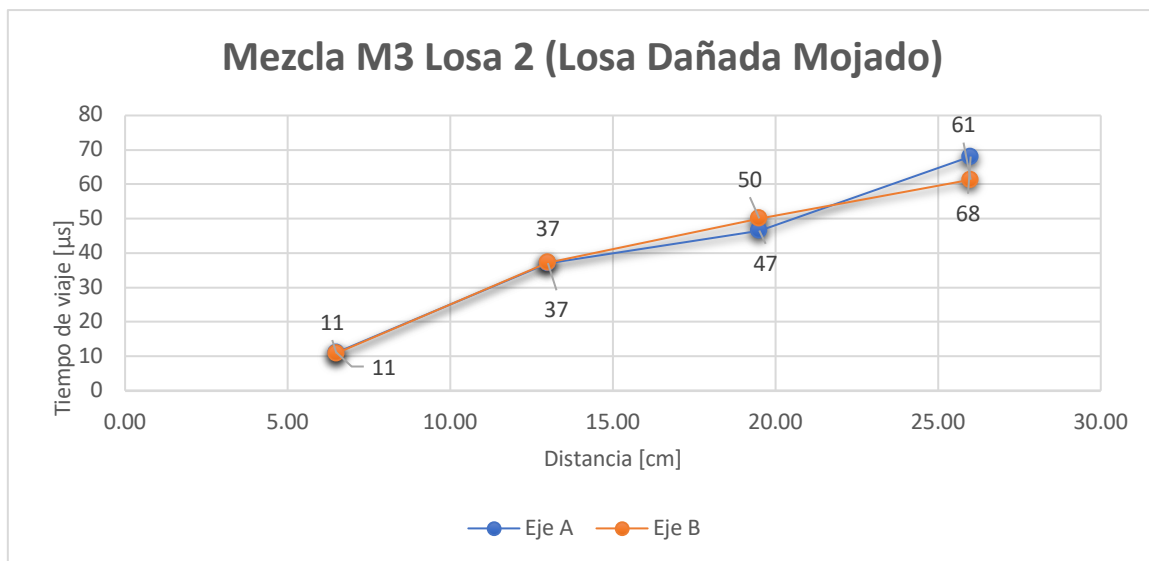


Figura No 16: Profundidad de daño M3, Losa 2 Losa en condiciones Mojadas.



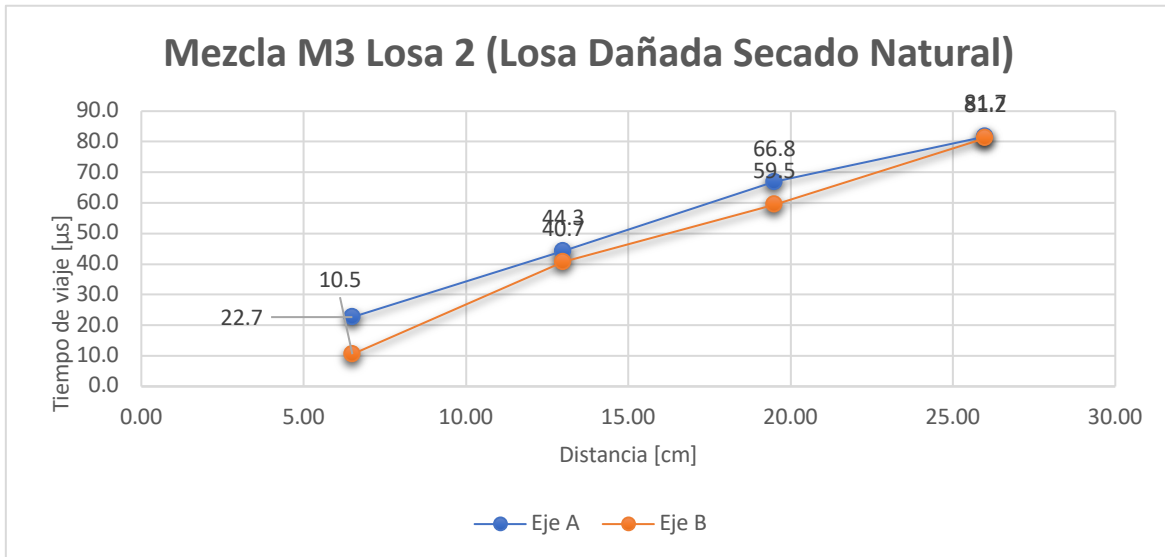


Figura No 17: Profundidad de daño M3, Losa 2 Losa en Secado Natural.

### Mezcla 3 Losa 3

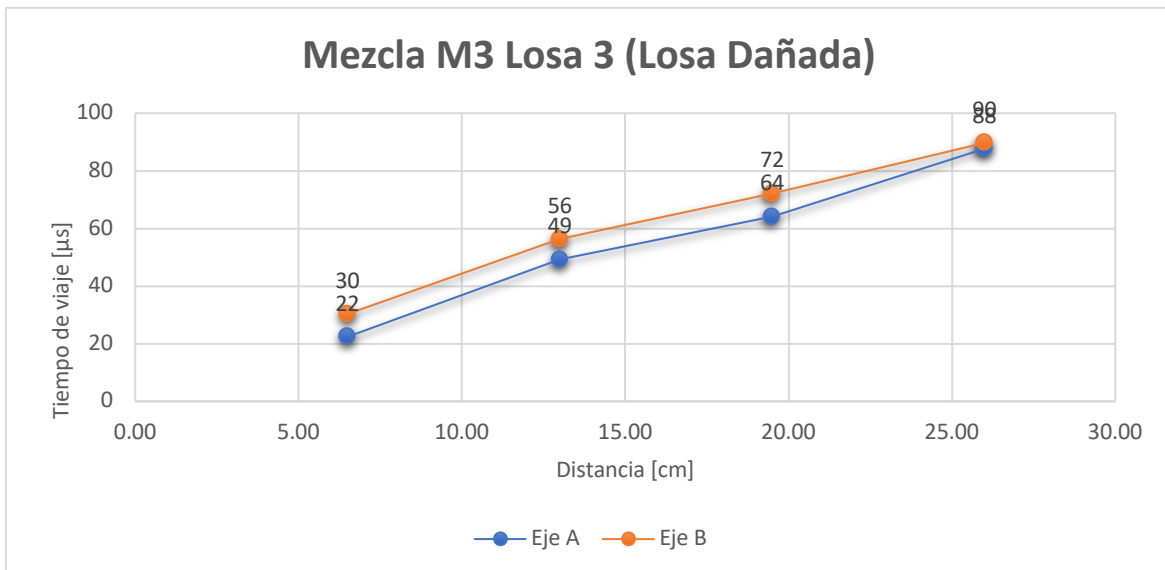


Figura No 18: Profundidad de daño M3, Losa 3 expuesta a temperatura de 450 °C.

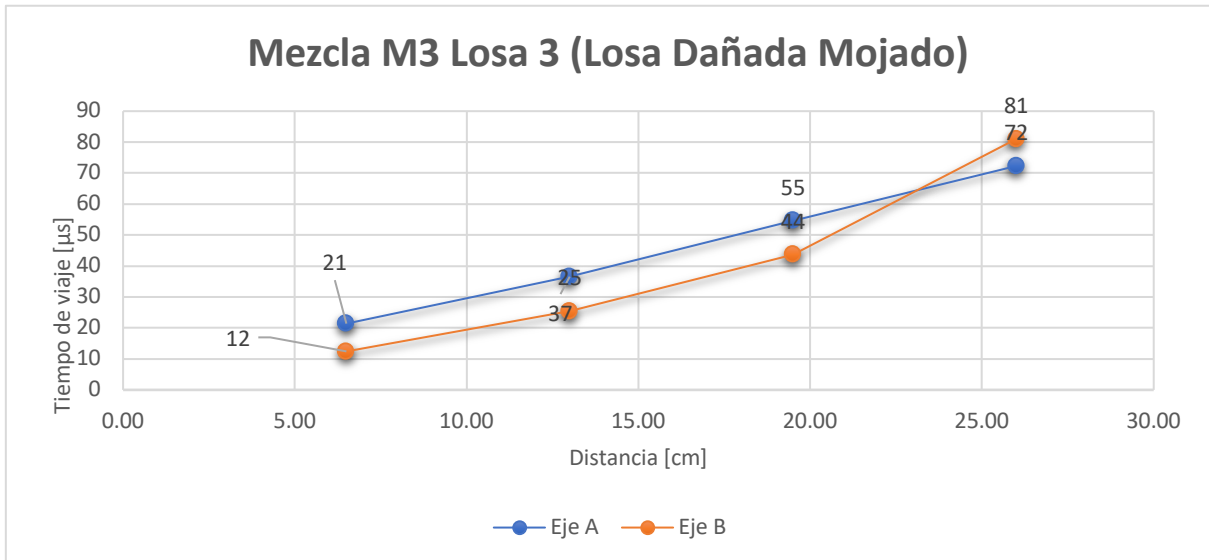


Figura No 19: Profundidad de daño M3, Losa 3 Losa en condiciones Mojadas.

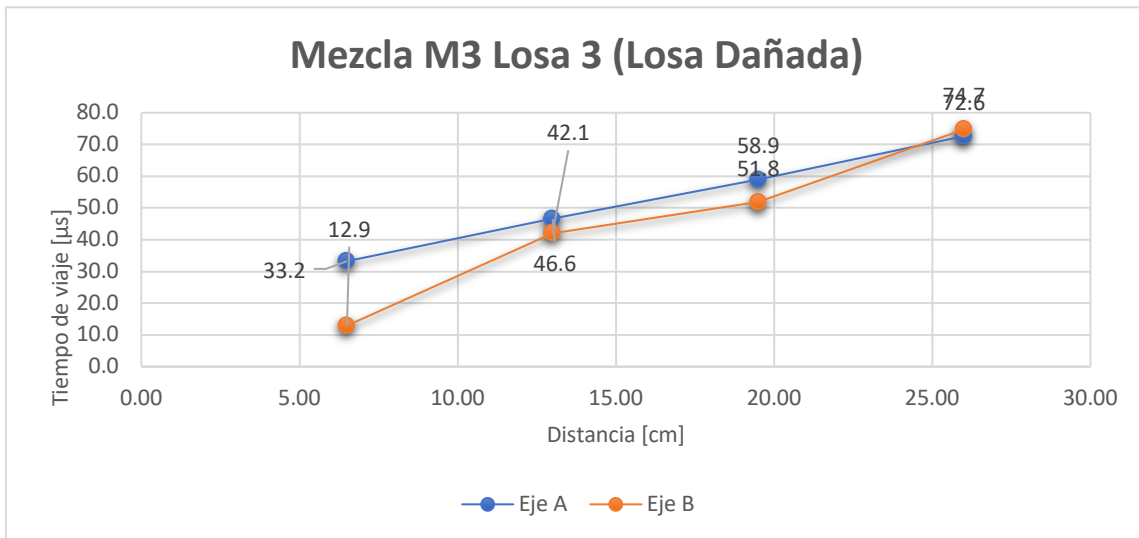


Figura No 20: Profundidad de daño M3, Losa 3 Losa en Secado Natural.

## Mezcla 4 Losa 1

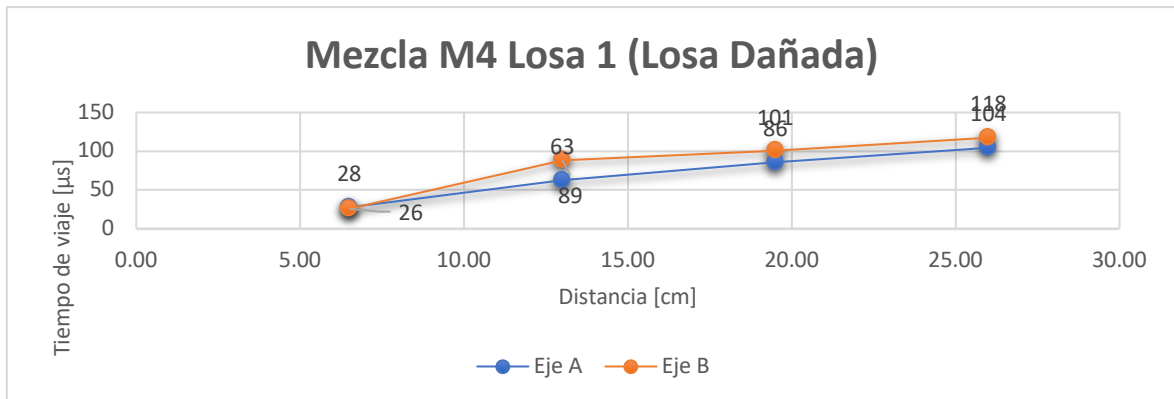


Figura No 21: Profundidad de daño M4, Losa 1 expuesta a temperatura de 450 °C.

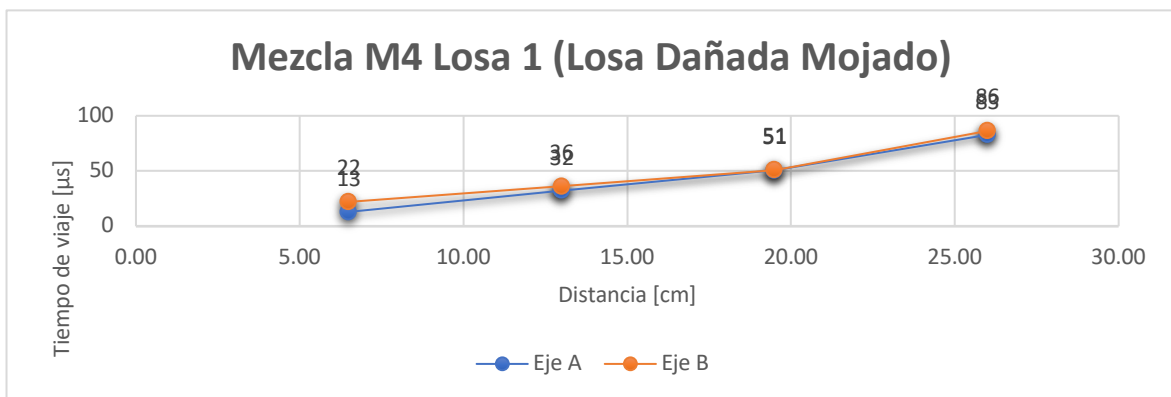


Figura No 22: Profundidad de daño M4, Losa 1 Losa en condiciones Mojadas.

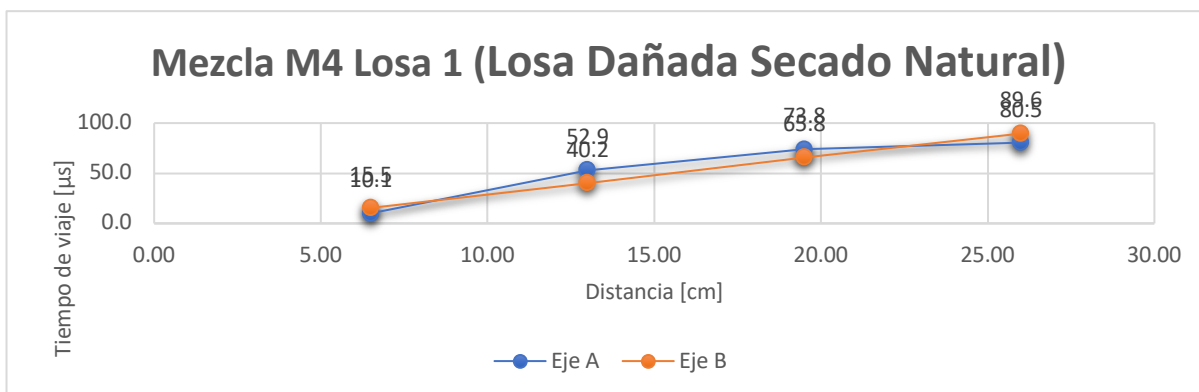


Figura No 23: Profundidad de daño M4, Losa 1 Losa en condiciones Mojadas.

### Mezcla 4 Losa 2

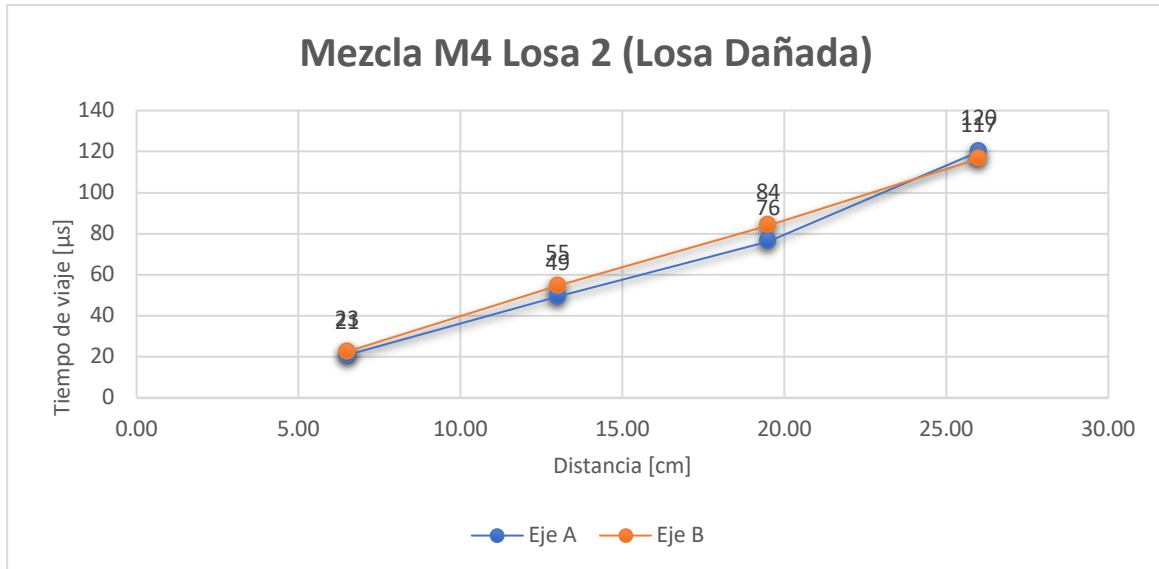


Figura No 24: Profundidad de daño M4, Losa 2 expuesta a temperatura de 450 °C.

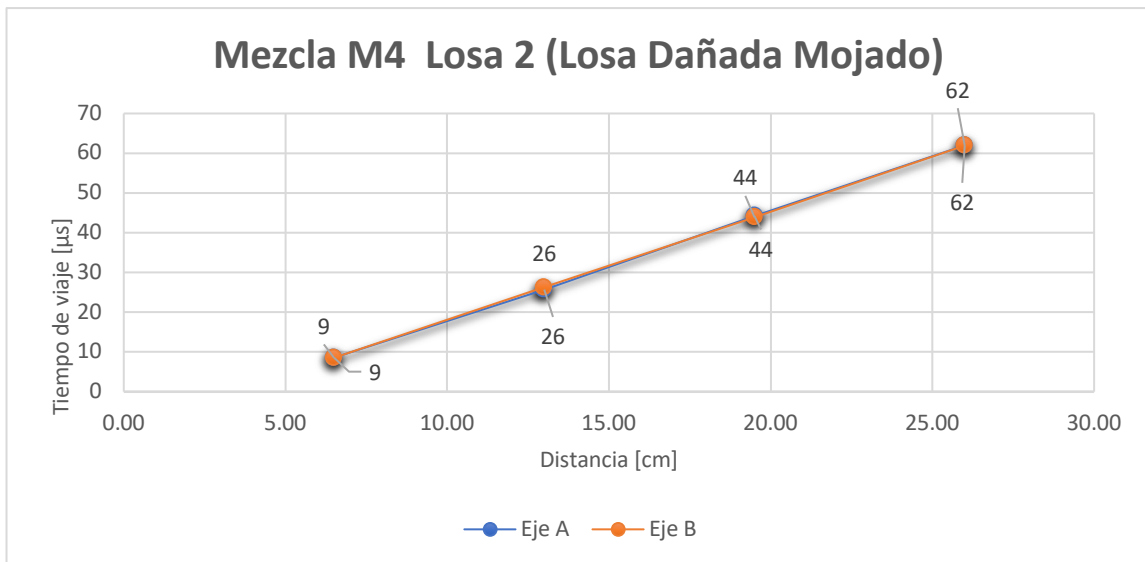


Figura No 25: Profundidad de daño M4, Losa 2 Losa en condiciones Mojadas.

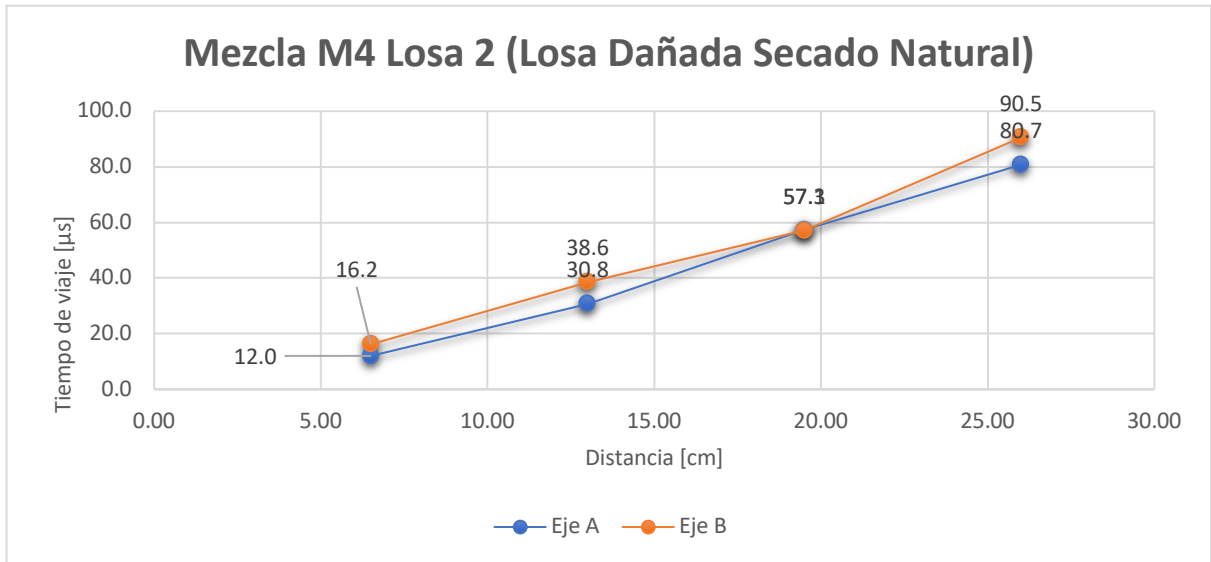


Figura No 26: Profundidad de daño M4, Losa 1 Losa en condiciones Mojadas.

## Anexo B: Datos obtenidos en el laboratorio tras exposición a 450 °C

### Losa M3-3

Tabla No 17 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
200	1	4040	4073	4040	4051
	2	4098	4124	4082	4101
	3	4000	4000	4000	4000
	4	4073	4082	4082	4079
400	5	4103	4082	4082	4089
	6	4124	4082	4082	4096
	7	4124	4103	4103	4110
399	8	4135	4113	4113	4120
	9	4109	4071	4088	4089
	10	4047	4071	4051	4056

Tabla No 18 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	21.5	24.5	21.3	22
135	A-A2	46.5	47	54	49
202.5	A-A3	64	64	64.1	64
270	A-A4	86	85.1	92	88
67.5	B-B1	30	30.5	30.5	30
135	B-B2	56	56.3	56.5	56
202.5	B-B3	68.8	73.5	74.1	72
270	B-B4	90	90	89.1	90

Tabla No 19 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	52	52	48	51
A prima	48	44	47	46
B	50	49	55	51
B Prima	50	54	52	52

### Losa M4-2

Tabla No 20 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
200	1	3883	3960	3992	3945
	2	3914	3914	3914	3914
	3	3976	3976	3984	3979
	4	4000	3976	3984	3987
400	5	4016	3996	4012	4008
	6	4044	4020	4024	4029
	7	4036	4024	4016	4025
401	8	4026	4022	4022	4023
	9	4030	4018	4022	4023
	10	4026	4022	4022	4023

Tabla No 21 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Media (chum Law (us))			Media (chum Law (us))
67.5	A-A1	20.6	21.1	21	21
135	A-A2	48.8	50.1	49	49
200	A-A3	70.3	83.9	74.4	76
270	A-A4	122.8	125	112	120
67.5	B-B1	21.7	22.6	23.3	23
135	B-B2	54.6	54.4	54.5	55
200	B-B3	77.7	79.2	95	84
270	B-B4	106.5	125.1	118	117

Tabla No 22 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	48	50	50	49
A prima	48	49	47	48
B	48	50	48	49
B Prima	50	47	49	49

Tabla No 23 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	74	78	76	76
2	72	78	78	76
3	76	78	82	79
4	82	76	78	79
5	140	142	146	143
6	146	154	150	150
7	142	138	148	143
8	140	134	138	137
9	136	142	140	139
10	140	142	142	141

**Losa M4-1**

Tabla No 24 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	3548	3542	3511	3534
	2	3438	3390	3362	3397
	3	3350	3390	3333	3358
	4	3225	3225	3199	3216
400	5	3640	3623	3591	3618
	6	3640	3673	3666	3660
	7	3690	3690	3717	3699
402	8	3602	3570	3592	3588
	9	3609	3641	3651	3634
	10	3599	3583	3625	3602

Tabla No 25 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
65	A-A1	26.6	26.9	29.7	28
135	A-A2	54.9	66.9	66.1	63
197	A-A3	86.4	85.4	85.2	86
266	A-A4	103.9	104.9	104.6	104
67	B-B1	23.6	29.1	25	26
133	B-B2	84	86.6	95.4	89
200	B-B3	100.9	99.9	101.4	101
270	B-B4	117.9	116.9	117.7	118

Tabla No 26 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	48	49	50	49
A prima	44	45	48	46
B	44	50	48	47
B Prima	48	48	48	48

Tabla No 27 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	89	86	81	85
2	84	81	84	83
3	91	86	88	88
4	84	88	86	86
5	125	129	135	130
6	130	132	136	133
7	135	132	136	134
8	119	125	136	127
9	124	131	132	129
10	137	129	131	132



### Losa M3-2

Tabla No 28 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	4033	4074	4024	4044
	2	4108	4142	4116	4122
	3	4000	4074	4066	4047
	4	4151	4142	4160	4151
400	5	4255	4255	4251	4254
	6	4269	4274	4260	4268
	7	4237	4224	4233	4231
400	8	4269	4215	4273	4252
	9	4237	4224	4233	4231
	10	4255	4278	4262	4265

Tabla No 29 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	26	26.3	23.4	25
135	A-A2	45.3	45.9	45.8	46
200	A-A3	72.5	72.2	72.4	72
270	A-A4	85	85.5	84.5	85
67.5	B-B1	23.6	22.5	21.6	23
135	B-B2	48	41.2	44.4	45
200	B-B3	68.9	74.9	69.2	71
270	B-B4	83.1	83.1	83.1	83

Tabla No 30 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	49	51	49	50
A prima	52	52	52	52
B	48	50	50	49
B Prima	48	49	50	49

Tabla No 31 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	77	75	78	77
2	76	71	73	73
3	75	78	78	77
4	73	76	76	75
5	153	149	145	149
6	145	150	148	148
7	151	142	143	145
8	134	132	137	134
9	146	147	139	144
10	141	147	146	145

**Losa M3-1**

Tabla No 32 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	3936	3926	3921	3928
	2	3984	3976	3936	3965
	3	3860	3870	3830	3853
	4	3905	3898	3913	3905
400	5	4132	4137	4115	4128
	6	4124	4115	4098	4112
	7	4132	4124	4115	4124
400	8	4154	4137	4128	4140
	9	4137	4137	4132	4135
	10	4128	4128	4103	4120

Tabla No 33 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	25	23.1	23.5	24
135	A-A2	51	51	49.2	50
200	A-A3	69.8	66	68.9	68
270	A-A4	88.1	87.9	87.6	88
67.5	B-B1	30.7	26.9	31.9	30
135	B-B2	42.6	43.5	43.1	43
200	B-B3	66.3	70.3	75.1	71
270	B-B4	77.6	77	78	78

Tabla No 34 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	51	49	47	49
A prima	49	51	52	51
B	51	50	50	50
B Prima	50	50	51	50

Tabla No 35 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	75	76	79	77
2	74	81	76	77
3	79	82	81	81
4	83	82	82	82
5	135	132	129	132
6	135	139	142	139
7	140	134	142	139
8	146	142	139	142
9	149	148	156	151
10	136	141	139	139

### Anexo C: Datos obtenidos en el laboratorio ‘Saturado air dry’

#### Losa M4-1

Tabla No 36 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
200	1	3891	3891	3876	3886
	2	3802	3795	3802	3800
	3	3876	3868	3861	3868
	4	4073	4082	4082	4079
400	5	3763	3770	3763	3765
	6	3717	3717	3742	3725
	7	3781	3777	3777	3778
399	8	3677	3701	3705	3694
	9	3708	3712	3719	3713
	10	3712	3719	3715	3715

Tabla No 36 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	11.3	16.2	11.5	13
135	A-A2	33.5	31.8	31.9	32
202.5	A-A3	50.8	50.8	50.2	51
270	A-A4	82.4	82.9	83	83
67.5	B-B1	22.3	21.7	22.2	22
135	B-B2	36	36.2	36.1	36
202.5	B-B3	52.1	51.1	49.9	51
270	B-B4	86.7	86.2	86.1	86

Tabla No 36 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	46	48	50	48
A prima	46	46	48	47
B	48	48	50	49
B Prima	50	48	46	48

Tabla No 37 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	98	101	98	99
2	96	99	99	98
3	98	99	99	99
4	99	101	100	100
5	139	138	145	141
6	151	163	160	158
7	160	159	155	158
8	147	150	146	148
9	124	126	129	126
10	139	133	139	137

### Losa M4-2

Tabla No 38 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
200	1	3883	3960	3992	3945
	2	3914	3914	3914	3914
	3	3976	3976	3984	3979
	4	4000	3976	3984	3987
400	5	4036	4032	4016	4028
	6	4040	4036	4036	4037
	7	4036	4036	4036	4036
401	8	4042	4046	4042	4043
	9	4046	4046	4046	4046
	10	4051	4046	4046	4048

Tabla No 39 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chum y Law (us)			Media (chum Law (us))
67.5	A-A1	8.8	8.4	8.5	9
135	A-A2	25.3	25.4	26.4	26
200	A-A3	43.8	44.1	44.7	44
270	A-A4	62	62	61.9	62
67.5	B-B1	8.8	8.4	8.4	9
135	B-B2	24.6	27	27.3	26
200	B-B3	43.8	44	43.9	44
270	B-B4	62	61.9	61.9	62

Tabla No 40 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	47	47	47	47
A prima	49	47	44	47
B	48	48	46	47
B Prima	48	47	46	47

Tabla No 41 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	71	74	71	72
2	76	81	84	80
3	78	80	78	79
4	76	76	80	77
5	165	164	165	165
6	163	156	163	161
7	165	165	166	165
8	140	138	150	143
9	165	157	161	161
10	150	158	153	154

**Losa M3-1**

Tabla No 42 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	4129	4120	4130	4126
	2	4120	4103	4112	4112
	3	4120	4120	4135	4125
	4	4095	4086	4074	4085
400	5	4196	4196	4209	4200
	6	4201	4179	4284	4221
	7	4249	4254	4254	4252
402	8	4201	4170	4179	4183
	9	4188	4174	4166	4176
	10	4196	4192	4192	4193

Tabla No 43 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
65	A-A1	21.1	21.1	20.9	21
135	A-A2	32	30.7	31	31
197	A-A3	44.2	44.8	44.6	45
266	A-A4	78.2	79.5	76.8	78
67	B-B1	23.6	23.1	23.1	23
133	B-B2	26.7	26.8	26.4	27
200	B-B3	46.1	46	46.2	46
270	B-B4	74.1	76.4	78.2	76

Tabla No 44 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	50	51	46	49
A prima	49	48	52	50
B	50	50	52	51
B Prima	50	50	48	49

Tabla No 45 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	84	80	78	81
2	72	78	78	76
3	84	86	88	86
4	76	78	80	78
5	158	160	160	159
6	160	158	158	159
7	158	160	158	159
8	170	170	168	169
9	168	166	170	168
10	168	168	165	167

### Losa M3-2

Tabla No 46 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	4231	4204	4204	4213
	2	4240	4249	4231	4240
	3	4186	4186	4186	4186
	4	4231	4231	4231	4231
400	5	4306	4306	4306	4306
	6	4251	4260	4255	4255
	7	4242	4233	4237	4237
400	8	4315	4320	4310	4315
	9	4273	4273	4274	4273
	10	4315	4306	4315	4312

Tabla No 47 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	11	11.1	11.2	11
135	A-A2	37	37	37.3	37
200	A-A3	47.2	47.3	45.2	47
270	A-A4	69.4	69	65.8	68
67.5	B-B1	10.9	11	10.8	11
135	B-B2	37.7	37.1	37	37
200	B-B3	43.3	53.1	53.9	50
270	B-B4	60.4	61.5	62.1	61

Tabla No 48 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	49	50	48	49
A prima	47	49	48	48
B	50	50	51	50
B Prima	46	48	50	48

Tabla No 49 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	73	76	74	74
2	77	79	78	78
3	77	79	79	78
4	77	76	78	77
5	163	163	161	162
6	161	163	163	162
7	160	163	161	161
8	165	162	162	163
9	160	162	160	161
10	162	160	159	160

### Losa M3-3

Tabla No 50 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	4252	4289	4252	4264
	2	4252	4252	4261	4255
	3	4146	4163	4154	4154
	4	4252	4289	4289	4277
400	5	4162	4154	4154	4157
	6	4145	4141	4145	4144
	7	4171	4180	4167	4173
400	8	4162	4184	4188	4178
	9	4167	4167	4162	4165
	10	4032	4021	3717	3923

Tabla No 51 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	22	19.1	23.1	21
135	A-A2	36.6	36.6	36.5	37
200	A-A3	54.6	54.6	54.7	55
270	A-A4	72.3	72.3	72.3	72
67.5	B-B1	12.7	12.4	12.2	12
135	B-B2	25.4	25.4	25.4	25
200	B-B3	43.4	44.3	43.4	44
270	B-B4	81.3	79.5	82.3	81

Tabla No 52 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	48	50	52	50
A prima	49	49	50	49
B	50	50	49	50
B Prima	48	51	52	50

Tabla No 53 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	62	69	65	65
2	65	63	63	64
3	76	75	79	77
4	71	75	72	73
5	162	158	158	159
6	149	153	159	154
7	150	154	155	153
8	154	158	158	157
9	151	155	157	154
10	160	154	149	154

## Anexo D: Datos obtenidos en el laboratorio ‘Seco al aire’

### Losa M4-2

Tabla No 54 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
200	1	3774	3745	3697	3739
	2	3802	3817	3817	3812
	3	3774	3774	3759	3769
	4	3795	3802	3802	3800
400	5	3771	3724	3724	3740
	6	3676	3742	3742	3720
	7	3752	3745	3752	3750
399	8	3680	3697	3693	3690
	9	3700	3711	3707	3706
	10	3650	3643	3636	3643

Tabla No 55 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	12	12.1	12	12
135	A-A2	30.8	30.7	30.8	31
202.5	A-A3	57.5	57.4	57.1	57
270	A-A4	81	80.7	80.5	81
67.5	B-B1	16	16.3	16.3	16
135	B-B2	38.6	38.7	38.5	39
202.5	B-B3	57.1	57.2	57.1	57
270	B-B4	90.2	90.7	90.6	91

Tabla No 56 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	46	45	46	46
A prima	48	48	47	48
B	47	46	48	47
B Prima	48	48	49	48

Tabla No 57 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	92	88	90	90
2	92	86	90	89
3	90	88	84	87
4	88	90	90	89
5	188	194	190	191
6	180	186	184	183
7	176	180	182	179
8	148	148	158	151
9	180	182	186	183
10	186	190	184	187



### Losa M3-3

Tabla No 58 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	4049	4040	4008	4032
	2	4098	4073	4124	4098
	3	4082	4082	4107	4090
	4	4090	4098	4098	4095
400	5	4188	4202	4188	4193
	6	4171	4167	4162	4167
	7	4228	4228	4237	4231
400	8	4255	4082	3721	4019
	9	4202	4202	4053	4152
	10	4167	4184	4171	4174

Tabla No 59 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	33.3	33	33.4	33
135	A-A2	46.6	46.6	46.5	47
200	A-A3	58.9	58.9	58.8	59
270	A-A4	74.5	72.7	70.7	73
67.5	B-B1	12.7	13.1	13	13
135	B-B2	41.6	42.5	42.2	42
200	B-B3	52.4	51.8	51.2	52
270	B-B4	77.1	74.9	72.2	75

Tabla No 60 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	52	50	53	52
A prima	50	50	48	49
B	52	50	50	51
B Prima	49	49	52	50

Tabla No 61 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	84	82	84	83
2	82	84	84	83
3	80	84	82	82
4	80	80	82	81
5	160	154	162	159
6	164	164	162	163
7	162	158	160	160
8	162	152	160	158
9	158	156	164	159
10	160	148	162	157

### Losa M3-1

Tabla No 62 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	4107	4073	4090	4090
	2	4292	4283	4274	4283
	3	4274	4274	4274	4274
	4	4283	4274	4301	4286
400	5	4175	4184	4180	4180
	6	4016	4053	4184	4084
	7	4167	4175	4175	4172
402	8	4171	4132	4132	4145
	9	4145	4137	4132	4138
	10	4197	4197	4175	4190

Tabla No 63 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
65	A-A1	29.1	34.5	27.2	30
135	A-A2	45.9	45.9	43.4	45
197	A-A3	62.4	58.6	61.5	61
266	A-A4	81	79.5	79.6	80
67	B-B1	8.8	8.9	8.9	9
133	B-B2	44.6	45	45.1	45
200	B-B3	52.63	52.6	53.3	53
270	B-B4	80.9	79.9	79.2	80

Tabla No 64 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	48	52	50	50
Aprima	51	50	51	51
B	48	49	48	48
B Prima	51	51	50	51

Tabla No 65 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	84	86	84	84.7
2	82	80	84	82.0
3	84	84	86	84.7
4	84	84	82	83.3
5	158	156	158	157.3
6	166	158	164	162.7
7	164	164	162	163.3
8	162	164	162	162.7
9	160	164	164	162.7
10	162	162	164	162.7

### Losa M3-2

Tabla No 66 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
198	1	4167	4184	4184	4178
	2	4193	4184	4184	4187
	3	4115	4098	4098	4104
	4	4141	4158	4132	4144
400	5	4128	4149	4158	4145
	6	4167	4149	4132	4149
	7	4167	4171	4171	4170
400	8	4158	4162	4162	4161
	9	4167	4175	4171	4171
	10	4171	4180	4167	4173

Tabla No 67 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	22.8	22.9	22.3	23
135	A-A2	44	44.3	44.5	44
200	A-A3	66.9	66.9	66.7	67
270	A-A4	80.5	82.3	82.3	82
67.5	B-B1	10.4	10.5	10.7	11
135	B-B2	41.5	40.2	40.5	41
200	B-B3	61.1	61.8	55.5	59
270	B-B4	82.5	80.5	80.5	81

Tabla No 68 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	50	50	49	50
A Prima	50	51	50	50
B	48	50	49	49
B Prima	50	51	48	50

Tabla No 69 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	84	86	84	85
2	90	88	88	89
3	88	88	90	89
4	84	84	82	83
5	162	166	170	166
6	172	168	170	170
7	178	172	176	175
8	174	176	176	175
9	170	176	176	174
10	174	172	174	173

### Losa M4-1

Tabla No 70 Vp

Distancia (mm)	Punto	Vp (m/s)			Media Vp (m/s)
200	1	3846	3846	3831	3841
	2	3868	3854	3854	3859
	3	3717	3786	3753	3752
	4	3766	3738	3738	3747
400	5	3740	3722	3707	3723
	6	3714	3728	3735	3726
	7	3731	3724	3731	3729
399	8	3707	3711	3711	3710
	9	3710	3720	3726	3719
	10	3786	3714	3752	3751

Tabla No 71 Chung y Law

Distancia (mm)	Punto	Chung y Law (us)			Media (chung Law (us))
67.5	A-A1	10.3	10	10	10
135	A-A2	52.2	54	52.6	53
202.5	A-A3	74.4	73.5	73.4	74
270	A-A4	81.5	80	80.1	81
67.5	B-B1	15.9	15.4	15.1	15
135	B-B2	40.5	40.4	39.8	40
202.5	B-B3	65.9	65.9	65.7	66
270	B-B4	89.4	89.4	89.9	90

Tabla No 72 Número de rebote

Cara	Número de Rebote			Promedio Número de Rebote
A	51	49	50	50
A prima	49	48	49	49
B	48	48	48	48
B Prima	47	49	47	48

Tabla No 73 Vs

#	Vs (m/s)			Promedio Vs (m/s)
1	94	92	96	94
2	94	96	94	95
3	94	94	96	95
4	92	96	94	94
5	164	166	162	164
6	178	176	182	179
7	176	174	174	175
8	168	168	164	167
9	182	176	180	179
10	162	164	166	164