

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MICROCONCRETO DE INYECCIÓN DE TÚNELES**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central De Venezuela

Por las Bachilleres:

Fermín M. Angeidy S.

Nemer V.Laurice L.

Para optar al Título de Ingeniero Civil

Caracas, 2012

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MICROCONCRETO DE INYECCIÓN DE TÚNELES**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ronald Torres

CO-TUTOR ACADÉMICO: Prof. Miguel Castillejo

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por las Bachilleres

Fermín M. Angeidy S. y Nemer V.Laurice L.

Para optar al Título de Ingeniero Civil.

Caracas, 2012

Por medio de la presente certifico que he leído el Trabajo Especial de Grado "CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MICROCONCRETO DE INYECCIÓN DE TUNELES", desarrollado por las bachilleres "Angeidy Selene Fermín Morrillo y Laurice Lawrance Nemer Vasquez" para optar por el título de Ingeniero Civil, y lo encuentro apropiado tanto en su contenido, como en su formato y apariencia externa.

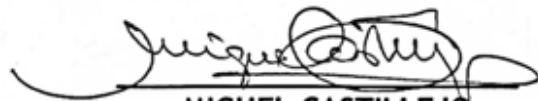
Considerando que cumple con los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA, autorizo se proceda a la entrega de los ejemplares respectivos ante el "Departamento de Ingeniería Estructural", para que sea sometido a evaluación por parte del jurado examinador que le sea asignado.

En Caracas, a los 6 días del mes de Junio del año 2012.



---

**RONALD TORRES**  
TUTOR



---

**MIGUEL CASTILLEJO**  
CO-TUTOR

## ACTA

El día 15 de Junio de 2012 se reunió el jurado formado por los profesores:

Ronald Torres  
Cesar Penuela  
José Guerrero

Con el fin de examinar el trabajo especial de grado titulado: "CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MICROCONCRETO DE INYECCIÓN DE TUNELES". Presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de Ingeniero Civil.

Una vez oída la defensa oral que el (las) bachiller(es) hicieron de su trabajo especial de grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Angeidy Fermín	20	VEINTE
Br. Laurice Nemer	20	VEINTE

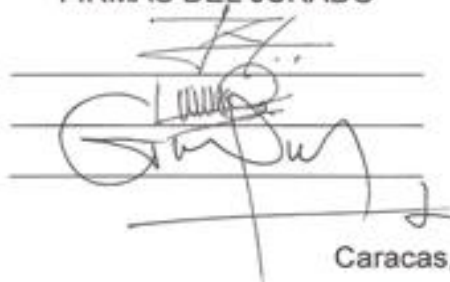
Recomendaciones:

---

---

---

### FIRMAS DEL JURADO



Caracas, 15 de Junio de 2012

## ACTA

Quienes suscriben, integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: "CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL MICROCONCRETO DE INYECCIÓN DE TÚNELES", presentado por las Bachilleres Laurice Nemer y Angeidy Fermín para optar al título de Ingeniero Civil, acordaron por unanimidad solicitarle a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace por considerar el aporte innovador en el estudio del comportamiento del Microconcreto de Inyección de Túneles sometidos a estados de Esfuerzo de Fatiga, empleando tecnología de Punta a nivel experimental.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a los quince días del mes de junio de dos mil doce.



RONALD TORRES  
TUTOR



MIGUEL CASTILLEJO  
TUTOR



JOSÉ ANTONIO GUERRERO  
Jurado Principal



CÉSAR PEÑUELA  
Jurado Principal

## **DEDICATORIA**

*Una dedicación especial a mis padres Clizaida y J. Rafael quienes cada día se esforzaron y dieron el todo por el todo para que realizara este sueño, por todas esas oraciones que hicieron en mi nombre y por todo el amor que siempre me han dado, por sus enseñanzas que las llevo en mi mente en cada decisión que tomo.*

*Dedico este trabajo a mi gran abuelo Víctor Fermín quien siempre me decía “mi nieta va a ser una gran ingeniera” siempre me vio en este momento, de ante mano el sabia que lo lograría. Gracias abuelo, aunque hoy no estés para llamarte y contarte sobre este trabajo para que te sintieras orgulloso de mi.*

*Angeidy Fermín*

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente a DIOS quien ha sido mi inspiración y el motor de mi vida.

A ti mami un doble agradecimiento por ser lo que eres conmigo y por siempre orientarme y comprenderme, tus palabras de aliento junto a tu amor de madre han sido mi soporte durante toda mi vida, te amo inmensamente gracias por ayudarme a levantarme y demostrarme que el mejor camino es seguir adelante.

A ti papa que cuando no conocía mi norte me hiciste fijarlo, dejaste que me encontrara conmigo misma, tu proyección era la correcta, gracias por facilitarme aquellas herramientas que consideraste necesarias y que me permitieron estudiar y hacer de mi una mujer de carácter que con sacrificios logra sus metas. Soy lo más parecido a ti.

A mi gordo (Luis Javier), me apoyaste hasta el final, gracias por todo el amor, la confianza y la paciencia a lo largo de este camino. Tu apoyo fue el complemento para el logro de este objetivo, este momento es tan perfecto contigo a mi lado.

A mis hermanos (Marcos, Luz, Antonio, Indu, Sarquis y Noe) quienes siempre me han transmitido ese amor de hermanos y han creído en mí. Los amo hermanos!, estoy orgullosa de contar con todos ustedes, y aquí estoy cumpliendo con lo esperado, (este logro es de los 7).

Al profesor Jesús Hernández quien ha sido un excelente amigo incondicional y orientador. Diría yo...un ángel con el cual pude contar a lo largo de toda la carrera (chuchu: gracias mil gracias por siempre estar cuando lo necesite, por preocuparte y ayudarme a buscar soluciones).

A mi costilla (Angeidy), por demostrarme que las amigas son las que están en todo momento, por cuidarme, acompañarme, ayudarme, aconsejarme y aguantarme el carácter. Contar contigo fue otro de mis regalos de Dios, te ganaste mi cariño, mi respeto y mi admiración, gracias por formar parte de esta experiencia inolvidable.

A ti Laura más que una sobrina una excelente amiga en quien confiar y con quien contar en todo momento eres 4x4.

A Lisi, por su cariño y apoyo incondicional en todo momento, quien siempre recalcó que debía cerrar este ciclo y comenzar uno nuevo, que siempre me dio el mejor consejo recordándome que mis estudios eran prioridad.

A Gina por toda esa ayuda brindada a lo largo de la carrera (mi profe de trigonometría), por siempre darme consejos y tenderme su mano cada vez que necesite (excelente asesora).

A todos mis amigos (ellos saben quienes son), y todos mis primos y primas quienes siempre me hicieron la pregunta ¿Cuánto falta?, pero en especial a ti Alba quien mas que una prima una hermana, siempre me hablaste tan bonito y me diste esas palabras alentadoras en cada situación.

Al profesor Adonais Alvarez, por sacar su buen humor y (ALTEREGO) en mis momentos más críticos... (Aunque aun me debes esos 6 puntos en algebra lineal).

A mis Tutores, Ronald Torres y Miguel Castillejo. Quienes son personajes importantes en toda esta historia, durante todos estos meses se ganaron mi cariño, respeto y admiración, no tengo palabras para agradecer toda la confianza que me brindaron y solo me queda decirles en estas cortas líneas que son lo máximo.

A la Universidad Central de Venezuela por brindarme la oportunidad de prepararme y pertenecer a ella. Con orgullo siempre llevare su nombre en alto.

Finalmente al documental “EL SECRETO”...quien me enseñó a pensar y a materializar, es cierto la mejor manera de ver realizar un sueño es visualizarse en el.

Laurice Lawrance Nemer V.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente la fuerza y todas las bendiciones que Dios me ha regalado, es quien ha estado en todo momento. Gracias a Dios estas palabras se escriben hoy.

Gracia a mis padres por siempre confiar en mí, aun en mis tropiezos. Gracias a ellos por no ejercer presiones de ningún tipo durante la elaboración de este trabajo. Les agradezco por entenderme y apoyarme en todo momento. Gracias papá por enseñarme a no tenerle miedo a los retos, y mi mami gracias por enseñarme que siempre se puede.

Gracias a mis hermanos por siempre estar al pendiente de mí. Por mis hermanos intento ser una mejor persona cada día para que sientan orgullo de tenerme como hermana, los amo.

Gracias a mis amigas por estar siempre conmigo, fuimos un real equipo de trabajo durante este proceso. Gracias Laurice y Laurita, cada una con su esencia. Siempre fueron el apoyo que Dios me regalo. Laurice una amiga incondicional de gran corazón y espíritu.

Un agradecimiento especial para nuestros tutores Ronald y Miguel quienes fueron amigos, maestros del conocimiento y un gran apoyo, sin ellos imposible.

Gracias a Jesús Hernández por cada una de las veces que me explico cálculo y me ayudo a enfrentar algunas vicisitudes que se presentaron en este camino. Chuchu siempre único como amigo.

Gracias al IMME y al Laboratorio de Rocas "Miguel Castillejo" por prestar sus instalaciones durante la elaboración de este TEG.

No me olvido del técnico Elione quien prestó su máxima colaboración y esfuerzo, siempre con buena voluntad de trabajar con nosotras. Muchísimas Gracias.

ANGEIDY FERMÍN

Caracas, 2012

**Fermín M. Angeidy S**

**Nemer V. Laurice L.**

## **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MICROCONCRETO DE INYECCIÓN DE TÚNELES**

**Tutor Académico: Prof. Ronald Torres**

**Co-Tutor: Prof. Miguel Castillejo**

**Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Civil. 2012, pág. (237).**

Palabras Clave: Microconcreto, Método LOCATI, Fatiga, Ensayo de Corte, lechada de inyección.

### **Resumen.**

El microconcreto de inyección utilizado durante el proceso de excavación en túneles, no es más que la colocación de una mezcla como relleno entre los espacios vacíos existentes en la dovela y el terreno. Esta mezcla se ve sometida a ciclos de carga y descarga que actúan en tiempos muy cortos pero que durante el proceso de construcción del túnel se presentan continuamente, generándose así un proceso de fatiga, por lo cual se hace necesario la aplicación de una mezcla de microconcreto capaz de resistir procesos de fatiga durante el proceso de construcción del túnel con el fin de que la estabilidad del terreno no se vea afectada.

Un túnel representa una obra de ingeniería estructural de gran importancia, por lo cual se hace necesario prestar atención a todas las acciones que afectan al mismo durante toda la vida útil.

La evaluación del comportamiento del microconcreto en las condiciones reales de trabajo en inyecciones de túneles de líneas de transporte subterráneo es una medida que permite predecir el deterioro frente a la presencia de cargas cortantes,

de fatiga y de tracción y a su vez poder obtener una comprensión de su trabajo y la integración del modelamiento con matriz de rocas. Los ensayos que se realizaron en el presente trabajo arrojan una serie de datos que expresan el comportamiento de la muestra sometida a acciones cíclicas de carga, esfuerzos a tracción, esfuerzos cortantes y métodos de ultrasonido comparativos, datos que comúnmente se utilizan con el fin de obtener un registro del deterioro y la evolución de la degradación y rotura del concreto.

Mediante los ensayos realizados se obtuvieron parámetros que son requeridos durante el diseño de túneles como son la resistencia al corte, la cohesión del material y el ángulo de fricción del mismo. Dentro de los resultados obtenidos la resistencia a corte del microconcreto en estado confinado varía dependiendo del plano de falla que se evalúe (distintos ángulos de colocación de las muestras), para el diseño propuesto es equivalente a una roca meteorizada, estando en el orden del 28 % de la resistencia en compresión.

El ensayo de pulso ultrasónico en probetas de microconcreto sometida a estados de carga cíclico arrojaron una tendencia general a disminuir tanto en onda P como en onda S, pero en variaciones menores del 5%, lo cual no permitiría servir como medida de control de daño.

El diseño de microconcreto planteado en este Trabajo Especial de Grado presento un mejor comportamiento a fatiga, ya que desde el tercer día tiene mayor competencia que la lechada de referencia y con el tiempo se mantiene estable para niveles de esfuerzos cíclicos cercanos a la falla.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>INTODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I .....</b>	<b>2</b>
I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
I.2 MARCO REFERENCIAL .....	4
I.3 OBJETIVOS .....	6
<i>I.3.1. Objetivo General</i> .....	6
<i>I.3.2. Objetivos Específicos</i> .....	6
<b>CAPITULO II .....</b>	<b>7</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
II.1 EL CONCRETO COMO MATERIAL .....	7
<i>II.1.2. Aire atrapado</i> .....	8
<i>II.1.3. Agregados</i> .....	8
II.2 RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO .....	8
<i>II.2.1. Relación agua/cemento</i> .....	9
<i>II.2.2. Composición y finura del cemento</i> .....	10
<i>II.2.3. Calidad de los agregados</i> .....	12
<i>II.2.4. Temperatura Ambiental</i> .....	13
<i>II.2.5. Curado</i> .....	13
II.3 MICROCONCRETO .....	13
<i>II.3.1. Cemento</i> .....	13
<i>II.3.2. Agua de mezclado</i> .....	14
<i>II.3.3. Agregado</i> .....	15
<i>II.3.3.1. Granulometría</i> .....	16
<i>II.3.3.2. Tamaño Máximo</i> .....	17
<i>II.3.3.3. Segregación del agregado</i> .....	17
<i>II.3.3.4. Porcentaje de absorción</i> .....	17
<i>II.3.3.5. Peso específico</i> .....	18
<i>II.3.3.6. Agregado saturado con superficie seca</i> .....	18
<i>II.3.3.7. Humedad del agregado</i> .....	18
<i>II.3.3.8. Ajuste de la cantidad de agua</i> .....	20
II.4 ASPECTOS GENERALES DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MICROCONCRETO EN ESTADO FRESCO .....	20
<i>II.4.1. Trabajabilidad</i> .....	20

II.4.2. Asentamiento .....	20
II.4.2.1. Cono de Abrams .....	21
II.4.3. Segregación del microconcreto .....	21
II.4.4. Fraguado del microconcreto .....	22
II.4.5. Compactación del microconcreto.....	22
II.5 RESISTENCIA DEL MICROCONCRETO .....	22
II.5.1. Curado de las probetas.....	23
II.5.2. Propiedades mecánicas.....	23
II.5.3. Criterios Mecánicos de Resistencia y Deformabilidad del microconcreto .....	24
II.5.3.1. Fuerzas ( $P$ ) .....	24
II.5.3.2. Esfuerzo $\sigma$ .....	25
II.5.3.3. Estado de esfuerzos .....	25
II.5.3.4. Deformación, $\epsilon$ .....	25
II.5.3.5. Resistencia, $\sigma_c$ .....	25
II.5.3.6. Rotura .....	26
II.5.3.7. Fractura .....	26
II.5.3.8. Cohesión, $C$ .....	27
II.5.3.9. Ángulo de fricción interna, $\phi$ .....	27
II.5.4 Constantes elásticas "estáticas" de deformación del microconcreto .....	27
II.5.4.1. Módulo de elasticidad o módulo de Young.....	28
II.6. CRITERIOS DE ROTURA, RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD .....	29
II.6.1. Criterios de Mohr-Coulomb.....	29
II.6.2. Criterio de rotura no lineal de Hoek&Brown.....	30
II.6.3. Obtención de la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb a partir de la envolvente de Hoek&Brown.....	32
II.6.3.1. Método de la equivalencia de áreas. ....	32
II.7 MICROCONCRETO DE INYECCIÓN PARA TÚNELES .....	33
II.8 ENSAYOS AL MICROCONCRETO .....	34
II.8.1. Compresión Uniaxial.....	34
II.8.2. Compresión Cíclica .....	36
II.8.3. Compresión diametral de discos. Ensayo brasilero.....	37
II.8.4. Ensayo de Corte Directo.....	40
II.8.5. Ensayo De Fatiga.....	41
II.8.5.1. Clasificación de los ensayos de fatiga .....	42
II.8.5.2. La fatiga depende fundamentalmente de las siguientes variables.....	43
II.8.5.3. El proceso de fatiga del concreto.....	43

II.9	MÉTODO LOCATI .....	44
II.10	ONDAS DE ULTRASONIDO .....	45
<b>CAPITULO III .....</b>		<b>47</b>
<b>MÉTODO .....</b>		<b>47</b>
III.1	SELECCIÓN DE LOS MATERIALES .....	47
III.2	DESCRIPCION DE MATERIALES EMPLEADOS .....	47
	<i>III.2.1 Agregado fino.....</i>	<i>47</i>
	<i>III.2.2 Cemento.....</i>	<i>47</i>
	<i>III.2.3 Agua.....</i>	<i>48</i>
	<i>III.2.4 Cemento Dental.....</i>	<i>48</i>
III.3	ENSAYOS REALIZADOS A LOS MATERIALES .....	48
III.4	DISEÑO DE MEZCLA PARA MICROCONCRETO .....	50
	<i>III.4.1 Análisis del agregado.....</i>	<i>50</i>
	<i>III.4.1.1 Granulometría de los agregados .....</i>	<i>50</i>
	<i>III.4.1.2 Determinación del peso específico y porcentaje de absorción .....</i>	<i>52</i>
	<i>III.4.2 Determinación general de la dosificación para mezclas de microconcreto.....</i>	<i>52</i>
	<i>III.4.2.1 Condición del agregado saturado con superficie seca, Asss.....</i>	<i>52</i>
	<i>III.4.2.2 Humedad.....</i>	<i>53</i>
	<i>III.4.2.3 Corrección de la cantidad de agua .....</i>	<i>53</i>
	<i>III.4.3 Medición del asentamiento con el Cono de Abrams .....</i>	<i>53</i>
III.5	ELABORACIÓN, CURADO Y ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO .....	54
	<i>III.5.1 Elaboración de probetas cilíndricas .....</i>	<i>55</i>
	<i>III.5.2 Elaboración de viguetas rectangulares.....</i>	<i>57</i>
	<i>III.5.3 Método para extracción de núcleos a partir de viguetas .....</i>	<i>57</i>
	<i>III.5.4 Método del ensayo a compresión con prensa universal.....</i>	<i>58</i>
	<i>III.5.5 Ensayo de compresión simple de núcleos de microconcreto.....</i>	<i>59</i>
III.6	ENSAYO DE CORTE DIRECTO/ANILLO DE CORTE CATS .....	61
III.7	ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (BRASILERO).....	65
III.8	ENSAYO DE FATIGA ACELERADA (LOCATI) .....	66
III.9	ENSAYO DE ULTRASONIDO.....	67
	<i>III.9.1 Ejecución del Ensayo CATS Ultrasónico.....</i>	<i>68</i>
III.10	ENSAYO LOCATI COMBINADO CON ENSAYO CATS ULTRASÓNICO .....	69
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>		<b>71</b>

IV.1	LECHADA DE INYECCIÓN DE OBRAS SUBTERRANEAS .....	71
IV.1.1	<i>Ensayo de Compresión Simple</i> .....	71
IV.1.2	ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (BRASILERO) .....	78
IV.1.3	ENSAYO LOCATI.....	81
IV.2	ESPECIFICACIONES DE LAS CARACTERISTICAS DEL AGREGADO FINO .....	86
IV.2.1	<i>Granulometría</i> .....	86
IV.2.2	<i>Contenido de Humedad</i> .....	87
IV.2.3	<i>Peso específico y porcentaje de absorción</i> .....	87
IV.3	ESPECIFICACIONES DE LA MEZCLA UTILIZADA .....	88
IV.3.1	<i>Proporciones del diseño de mezcla utilizado</i> .....	88
IV.3.2	<i>Medición de asentamiento (T) por el cono de Abrams</i> .....	88
IV.3.3	<i>Densidad del Microconcreto en estado endurecido</i> .....	88
IV.4	PRUEBA DE ULTRASONIDO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	88
IV.5	ENSAYOS REALIZADOS A ESPÉCIMENES DE MICROCONCRETO.....	90
IV.5.1	<i>Ensayo a Compresión Simple</i> .....	90
IV.5.1.1	<i>Resumen del Ensayo a Compresión Simple</i> .....	101
IV.5.2	<i>Ensayo de Compresión Cíclica</i> .....	102
IV.5.2.1	<i>Resumen del Ensayo a Compresión Cíclica</i> .....	111
IV.5.3	<i>Ensayo de Tracción Indirecta</i> .....	112
IV.5.3.1	<i>Resumen del Ensayo a Tracción Indirecta</i> .....	125
IV.6	CRITERIO DE HOEK&BROWN MEDIANTE EL MÉTODO DE LA EQUIVALENCIA DE ÁREAS .....	126
IV.7	ENSAYO LOCATI .....	128
IV.7.1	<i>Espécimen ensayado a los 3 días de curado</i> .....	129
IV.7.2	<i>Espécimen ensayado a los 7 días de curado</i> .....	133
IV.7.3	<i>Espécimen ensayado a los 14 días de curado</i> .....	141
IV.7.4	<i>Espécimen ensayado a los 28 días de curado</i> .....	145
IV.8	ENSAYO DE CORTE DIRECTO .....	149
IV.8.1	<i>Tendencia de Esfuerzos para cada espécimen</i> .....	150
IV.8.2	<i>Ángulos de Fricción y valor de la Cohesión para cada espécimen a partir de las líneas de tendencia de sus esfuerzos</i> .....	162
IV.8.3	<i>Tendencia de Esfuerzos para todas las Etapas y Especímenes</i> .....	163
IV.9	ENSAYO DE PULSO ULTRASÓNICO PARA ESPÉCIMENES NO ENSAYADOS .....	165
IV.10	ENSAYO LOCATI CON ULTRASONIDO EN TIEMPOS DE ESPERA A CARGA CONSTANTE .....	166
IV.10.1	<i>Resumen de Velocidades de Ondas P y S en todas las etapas de espera durante la ejecución del Ensayo LOCATI para el espécimen 1</i> .....	171
IV.10.2	<i>Resumen de Velocidades de Ondas P y S en todas las etapas de espera durante la ejecución del Ensayo LOCATI para el espécimen 2</i> .....	177

<b>CAPITULO V .....</b>	<b>180</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>180</b>
V.1 CONCLUSIONES .....	180
V.2 RECOMENDACIONES .....	181
BIBLIOGRAFÍA .....	182
<b>APENDICE.....</b>	<b>185</b>
APENDICE I: .....	185
<i>I.1 Ondas de ultrasonido del ensayo LOCATI con ultrasonido en tiempos de espera a carga constante .....</i>	<i>185</i>
<i>I.2 Ondas de ultrasonido para el espécimen 2 .....</i>	<i>208</i>
APENDICE II: .....	231
<i>II.1 Descripción y especificaciones del programa utilizado para la realización de los ensayos.</i>	<i>231</i>
.....	231
APENDICE III: .....	233
<i>III.1 Programa RocLab .....</i>	<i>233</i>
<i>III.2 Parámetros de selección para el uso del programa RocLab .....</i>	<i>234</i>
APENDICE IV .....	237
<i>IV.1 Unidades de conversión utilizadas .....</i>	<i>237</i>



## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 COMPONENTES MINERALÓGICOS DEL CEMENTO PORTLAND .....	10
TABLA 2 TIPOS DE CEMENTO PORTLAND, SEGÚN COVENIN 28 Y ASTM C150.....	11
TABLA 3 ÓXIDOS QUÍMICOS DEL CEMENTO PORTLAND.....	11
TABLA 4 PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES MINERALÓGICOS DEL CEMENTO.....	12
TABLA 5 LÍMITES GRANULOMÉTRICOS DEL AGREGADO FINO.....	16
TABLA 6 NORMAS COVENIN PARA EL ANÁLISIS. (ELABORACIÓN PROPIA).....	48
TABLA 7 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA. (ELABORACIÓN PROPIA).....	52
TABLA 8 INFORMACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS DE COMPRESIÓN SIMPLE. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	60
TABLA 9 ENSAYO DE CORTE DIRECTO. PROGRAMACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.....	64
TABLA 10 ENSAYO BRASILEIRO. PROGRAMACIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	65
TABLA 11 PROGRAMACIÓN DEL ENSAYO DE FATIGA ACELERADA POR EL MÉTODO LOCATI. ....	66
TABLA 12 ENSAYO LOCATI COMBINADO CON ULTRASONIDO. PROGRAMACIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA) .	70
TABLA 13 DATOS ESPÉCIMEN MII (ELABORACIÓN PROPIA) .....	72
TABLA 14 RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN. ESPÉCIMEN MII. ELABORACIÓN PROPIA .....	72
TABLA 15 DATOS ESPÉCIMEN 2R. ELABORACIÓN PROPIA. ....	75
TABLA 16 RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN. ESPÉCIMEN 2R. ELABORACIÓN PROPIA .....	75
TABLA 17 DATOS DEL ESPÉCIMEN MII. ELABORACIÓN PROPIA.....	79
TABLA 18 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA EL ESPÉCIMEN MII. ELABORACIÓN PROPIA .....	79
TABLA 19 DATOS DEL ESPÉCIMEN 2R. ELABORACIÓN PROPIA .....	80
TABLA 20 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA EL ESPÉCIMEN 2R. ELABORACIÓN PROPIA .....	80
TABLA 21 DATOS DEL ESPÉCIMEN MII. ELABORACIÓN PROPIA .....	82
TABLA 22 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO LOCATI PARA EL ESPÉCIMEN MII. ELABORACIÓN PROPIA.....	82
TABLA 23 DATOS DEL ESPÉCIMEN 2R_01. ELABORACIÓN PROPIA.....	84
TABLA 24 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO LOCATI PARA EL ESPÉCIMEN 2R_01. ELABORACIÓN PROPIA.....	84
TABLA 25 DATOS DEL ESPÉCIMEN 2R_02. ELABORACIÓN PROPIA.....	85
TABLA 26 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO LOCATI PARA EL ESPÉCIMEN 2R_02.....	85
TABLA 27: PORCENTAJE DE PASANTES DEL AGREGADO FINO UTILIZADO EN LA MEZCLA. ELABORACIÓN PROPIA .....	86
TABLA 28: CONTENIDO DE HUMEDAD. ELABORACIÓN PROPIA. ....	87
TABLA 29: PESO ESPECÍFICO Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO (ARENA). ELABORACIÓN PROPIA.....	87

TABLA 30 PROPORCIONES DEL DISEÑO DE MEZCLA. ELABORACIÓN PROPIA .....	88
TABLA 31: ASENTAMIENTO DE LA MEZCLA. ELABORACIÓN PROPIA.....	88
TABLA 32: DENSIDAD CALCULADA PARA CADA UNO DE LOS CILINDROS NORMALIZADOS. ELABORACIÓN PROPIA.....	88
TABLA 33: RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y ULTRASONIDO EN CILINDROS NORMALIZADOS. ELABORACIÓN PROPIA .....	88
TABLA 34 COMPRESIÓN SIMPLE. DATOS DEL ESPÉCIMEN 1. ELABORACIÓN PROPIA.....	91
TABLA 35: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA EL ESPÉCIMEN 1. ELABORACIÓN PROPIA .....	91
TABLA 36 COMPRESIÓN SIMPLE. DATOS DEL ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA.....	93
TABLA 37 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA EL ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA .....	93
TABLA 38 COMPRESIÓN SIMPLE. DATOS DEL ESPÉCIMEN 3. ELABORACIÓN PROPIA .....	95
TABLA 39: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA EL ESPÉCIMEN 3. ELABORACIÓN PROPIA .....	95
TABLA 40 COMPRESIÓN SIMPLE. DATOS DEL ESPÉCIMEN 4. ELABORACIÓN PROPIA .....	97
TABLA 41 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA EL ESPÉCIMEN 4. ELABORACIÓN PROPIA .....	97
TABLA 42 COMPRESIÓN SIMPLE. DATOS DEL ESPÉCIMEN 5. ELABORACIÓN PROPIA .....	99
TABLA 43 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA EL ESPÉCIMEN 5. ELABORACIÓN PROPIA .....	99
TABLA 44 RESUMEN DE RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESIÓN SIMPLE CONTROLADO. ELABORACIÓN PROPIA.....	101
TABLA 45 COMPRESIÓN CÍCLICA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 6. ELABORACIÓN PROPIA .....	103
TABLA 46 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA PARA EL ESPÉCIMEN 6. ELABORACIÓN PROPIA .....	103
TABLA 47COMPRESIÓN CÍCLICA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 6A. ELABORACIÓN PROPIA.....	105
TABLA 48 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA PARA EL ESPÉCIMEN 6A. ELABORACIÓN PROPIA .....	105
TABLA 49COMPRESIÓN CÍCLICA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 7. ELABORACIÓN PROPIA .....	107
TABLA 50 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA PARA EL ESPÉCIMEN 7. ELABORACIÓN PROPIA .....	107
TABLA 51 COMPRESIÓN CÍCLICA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 8. ELABORACIÓN PROPIA .....	109
TABLA 52 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA PARA EL ESPÉCIMEN 8. ELABORACIÓN PROPIA .....	109
TABLA 53 RESUMEN DE RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESIÓN CÍCLICA. : ELABORACIÓN PROPIA....	111
TABLA 54 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 1. ELABORACIÓN PROPIA .....	113

TABLA 55 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA EL ESPÉCIMEN 1. ELABORACIÓN PROPIA. ....	113
TABLA 56 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA .....	115
TABLA 57 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA EL ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA .....	115
TABLA 58 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 3. ELABORACIÓN PROPIA .....	117
TABLA 59 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA EL ESPÉCIMEN 3. ELABORACIÓN PROPIA .....	117
TABLA 60 DATOS DEL ESPÉCIMEN 4. ELABORACIÓN PROPIA.....	119
TABLA 61 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA EL ESPÉCIMEN 4. ELABORACIÓN PROPIA .....	119
TABLA 62 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 5. ELABORACIÓN PROPIA.....	121
TABLA 63 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA EL ESPÉCIMEN 5. ELABORACIÓN PROPIA .....	121
TABLA 64 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. DATOS DEL ESPÉCIMEN 6. ELABORACIÓN PROPIA .....	123
TABLA 65 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA PARA EL ESPÉCIMEN 6. ELABORACIÓN PROPIA .....	123
TABLA 66 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. RESUMEN DE RESULTADOS. ELABORACIÓN PROPIA.....	125
TABLA 67 DATOS DEL ESPÉCIMEN 10. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	129
TABLA 68 RESULTADOS OBTENIDOS, ESPÉCIMEN 10. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA.....	129
TABLA 69 DATOS DEL ESPÉCIMEN 11. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	133
TABLA 70 RESULTADOS OBTENIDOS, ESPÉCIMEN 11. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA.....	133
TABLA 71 DATOS DEL ESPÉCIMEN 12. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	137
TABLA 72 RESULTADOS OBTENIDOS, ESPÉCIMEN 12. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA.....	137
TABLA 73 DATOS DEL ESPÉCIMEN 13. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	141
TABLA 74 RESULTADOS OBTENIDOS, ESPÉCIMEN 13. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA.....	141
TABLA 75 DATOS DEL ESPÉCIMEN 14. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	145
TABLA 76 RESULTADOS OBTENIDOS, ESPÉCIMEN 14. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA.....	145
TABLA 77 DATOS DEL ESPÉCIMEN 11. ENSAYO DE CORTE DIRECTO. ELABORACIÓN PROPIA.....	150
TABLA 78 ESFUERZOS PICO Y RESIDUALES. ESPÉCIMEN 11 EN SUS 4 ETAPAS. ELABORACIÓN PROPIA....	150
TABLA 79 DATOS DEL ESPÉCIMEN 12. ENSAYO DE CORTE DIRECTO. ELABORACIÓN PROPIA.....	152
TABLA 80 ESFUERZOS PICO Y RESIDUALES. ESPÉCIMEN 12 EN SUS 4 ETAPAS. ELABORACIÓN PROPIA....	152
TABLA 81 DATOS DEL ESPÉCIMEN 13A. ENSAYO DE CORTE DIRECTO. ELABORACIÓN PROPIA .....	154
TABLA 82 ESFUERZOS PICO Y RESIDUALES. ESPÉCIMEN 13A EN SUS 4 ETAPAS. ELABORACIÓN PROPIA .	154
TABLA 83 DATOS DEL ESPÉCIMEN 13B. ENSAYO DE CORTE DIRECTO. ELABORACIÓN PROPIA .....	156
TABLA 84 ESFUERZOS PICO Y RESIDUALES. ESPÉCIMEN 13B EN SUS 4 ETAPAS. ELABORACIÓN PROPIA .	156
TABLA 85 DATOS DEL ESPÉCIMEN 14. ENSAYO DE CORTE DIRECTO. ELABORACIÓN PROPIA.....	158

TABLA 86 ESFUERZOS PICO Y RESIDUALES. ESPÉCIMEN 14 EN SUS 4 ETAPAS. ELABORACIÓN PROPIA....	158
TABLA 87 DATOS DEL ESPÉCIMEN 15. ENSAYO DE CORTE DIRECTO. ELABORACIÓN PROPIA.....	160
TABLA 88 ESFUERZOS PICO Y RESIDUALES. ESPÉCIMEN 15 EN SUS 4 ETAPAS. ELABORACIÓN PROPIA....	160
TABLA 89 ENSAYO DE CORTE. ECUACIÓN DE LA RECTA Q CARACTERIZA LA TENDENCIA DE LOS ESFUERZOS. ELABORACIÓN PROPIA .....	162
TABLA 90 ENSAYO DE CORTE. ANGULO DE FRICCIÓN Y VALOR DE LA COHESIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.	162
TABLA 91: TENDENCIA DE ESFUERZOS PICOS Y RESIDUALES PARA TODAS LAS ETAPAS Y ESPECÍMENES. ENSAYO DE CORTE DIRECTO ELABORACIÓN PROPIA. ....	163
TABLA 92 DATOS DE LOS ESPECÍMENES UTILIZADOS PARA EL ENSAYO DE PULSO ULTRASÓNICO. ELABORACIÓN PROPIA .....	165
TABLA 93 VELOCIDADES OBTENIDAS CON EL ENSAYO DE PULSO ULTRASÓNICO. ELABORACIÓN PROPIA.	165
TABLA 94 DATOS DEL ESPÉCIMEN 1 ENSAYADO CON MÉTODO LOCATI Y MEDICIONES DE VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO EN TIEMPOS DE ESPERA A CARGA CONSTANTE. ELABORACIÓN PROPIA .....	167
TABLA 95 RESULTADOS OBTENIDOS. ESPÉCIMEN 1, ENSAYADO CON MÉTODO LOCATI Y MEDICIONES DE VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO EN TIEMPOS DE ESPERA A CARGA CONSTANTE. ELABORACIÓN PROPIA.....	167
TABLA 96 VALORES DE LAS VELOCIDADES OBTENIDAS EN CADA ETAPA DE ESPERA DURANTE EL ENSAYO LOCATI PARA EL ESPÉCIMEN 1. ELABORACIÓN PROPIA .....	171
TABLA 97 DATOS DEL ESPÉCIMEN 2 ENSAYADO CON MÉTODO LOCATI Y MEDICIONES DE VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO EN TIEMPOS DE ESPERA A CARGA CONSTANTE. ELABORACIÓN PROPIA .....	173
TABLA 98 RESULTADOS OBTENIDOS. ESPÉCIMEN 2, ENSAYADO CON MÉTODO LOCATI Y MEDICIONES DE VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO EN TIEMPOS DE ESPERA A CARGA CONSTANTE. ELABORACIÓN PROPIA.....	173
TABLA 99 VALORES DE LAS VELOCIDADES OBTENIDAS EN CADA ETAPA DE ESPERA DURANTE EL ENSAYO LOCATI PARA EL ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA .....	177

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 PORCENTAJE DE LOS COMPONENTES DEL CONCRETO. (CAVIEDES, 2005).....	7
FIGURA 2 RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO. (PORRERO, RAMOS, GRASES, & VELAZCO, 2009, PÁG. 244) .....	8
FIGURA 3 DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS.....	19
FIGURA 4 MEDICIÓN DEL ASENTAMIENTO .....	21
FIGURA 5 REPRESENTACIÓN DE LA ENVOLVENTE DE MOHR-COULOMB EN EL ESPACIO DE TENSIONES NORMAL Y TANGENCIAL. (MELENTIJEVIC, 2005).....	29
FIGURA 6 REPRESENTACIÓN GRAFICA DEL CRITERIO DE HOEK&BROWM MEDIANTE EL MÉTODO DE LA EQUIVALENCIA DE ÁREAS.(PUELL, 2004).....	33
FIGURA 7 CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA ESPÉCIMENES SOMETIDOS A COMPRESIÓN MONOAXIAL CÍCLICA. (SUMINISTRADA POR EL PROF. MIGUEL CASTILLEJO) .....	37
FIGURA 8 ESQUEMA DE ENSAYO BRASILEIRO. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	38
FIGURA 9 DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE ESFUERZOS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. ....	39
FIGURA 10 ESQUEMA DE UN CUERPO SOMETIDO A UNA CARGA CÍCLICA. ....	42
FIGURA 11 PROCESO DE TAMIZADO PARA ELABORACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA .....	51
FIGURA 12 PROCESO DE MEDICIÓN DEL ASENTAMIENTO. (ELABORACIÓN PROPIA).....	54
FIGURA 13 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA MEZCLA. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	55
FIGURA 14 ELABORACIÓN DE PROBETAS. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	56
FIGURA 15 ELABORACIÓN DE VIGUETAS RECTANGULARES. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	57
FIGURA 16 DESENCOFRADO DE VIGUETAS Y EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS. (ELABORACIÓN PROPIA).....	58
FIGURA 17 ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS NORMALIZADOS. (ELABORACIÓN PROPIA). ....	59
FIGURA 18 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE. COLACIÓN DEL ESPÉCIMEN. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	60
FIGURA 19 ENSAYO DE CORTE DIRECTO. POSICIONAMIENTO DEL ESPÉCIMEN. (ELABORACIÓN PROPIA) ....	61
FIGURA 20 ENSAYO DE CORTE DIRECTO. PREPARACIÓN DE MEZCLA Y ESPÉCIMEN DENTRO DE ANILLOS DE LA CAJA DE CORTE. (ELABORACIÓN PROPIA).....	62
FIGURA 21 ENSAYO DE CORTE DIRECTO. COLOCACIÓN DEL ANILLO SUPERIOR Y ESTADO FINAL DE LA MUESTRA CONFINADA. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	62
FIGURA 22 ENSAYO DE CORTE DIRECTO. MUESTRAS CONFINADAS EN ESPERA DE TIEMPO DE FRAGUADO. ELABORACIÓN PROPIA. ....	63
FIGURA 23 ENSAYO DE CORTE DIRECTO. CAPSULA CONFINANTE DENTRO DE LA CAJA DE CORTE. ELABORACIÓN PROPIA .....	63
FIGURA 24 ENSAYO DE CORTE DIRECTO. UBICACIÓN DE TRANSDUCTORES DE VARIACIÓN DIFERENCIAL LINEAL .....	64
FIGURA 25 ENSAYO BRASILEIRO. ORIENTACIÓN DEL ESPÉCIMEN A ENSAYAR. (ELABORACIÓN PROPIA).....	65
FIGURA 26 ENSAYO DE ULTRASONIDO EN ESPÉCIMENES SIN ENSAYAR. (ELABORACIÓN PROPIA).....	67
FIGURA 27 ENSAYO CATS ULTRASÓNICO. ELABORACIÓN PROPIA. ....	68

FIGURA 28 ENSAYO A COMPRESIÓN, ESPÉCIMEN MII. ESFUERZO DESVIADO- DEFORMACIÓN AXIAL.....	72
FIGURA 29 ENSAYO DE ULTRASONIDO, ONDA P. ESPÉCIMEN MII. ELABORACIÓN PROPIA .....	73
FIGURA 30 ENSAYO DE ULTRASONIDO, ZOOM_ONDA P. ESPÉCIMEN MII. ELABORACIÓN PROPIA .....	73
FIGURA 31 ENSAYO DE ULTRASONIDO, ONDA S. ESPÉCIMEN MII. ELABORACIÓN PROPIA .....	74
FIGURA 32 ENSAYO DE ULTRASONIDO, ZOOM_ONDA S. ESPÉCIMEN MI. ELABORACIÓN PROPIA.....	74
FIGURA 33 ENSAYO A COMPRESIÓN, ESPÉCIMEN 2R. ESFUERZO DESVIADO- DEFORMACIÓN AXIAL. ELABORACIÓN PROPIA .....	75
FIGURA 34 ENSAYO DE ULTRASONIDO, ONDA P. ESPÉCIMEN 2R. ELABORACIÓN PROPIA.....	76
FIGURA 35 ENSAYO DE ULTRASONIDO, ZOOM_ONDA P. ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA.....	76
FIGURA 36 ENSAYO DE ULTRASONIDO, ONDA S. ESPÉCIMEN 2R. ELABORACIÓN PROPIA .....	77
FIGURA 37 ENSAYO DE ULTRASONIDO, ZOOM_ONDA S. ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA.....	77
FIGURA 38 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN MII, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA.....	79
FIGURA 39 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 2R, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA.....	80
FIGURA 40 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN MII. ENSAYO LOCATI .....	82
FIGURA 41 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN MII. ENSAYO LOCATI.....	82
FIGURA 42 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 2R_01. ENSAYO LOCATI.....	84
FIGURA 43 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 2R_01. ENSAYO LOCATI.....	84
FIGURA 44 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 2R_02. ENSAYO LOCATI.....	85
FIGURA 45 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 2R_02. ENSAYO LOCATI.....	85
FIGURA 46 GRÁFICO GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO. ELABORACIÓN PROPIA .....	86
FIGURA 48 RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DE LOS DÍAS DE CURADO. ELABORACIÓN PROPIA ...	89
FIGURA 49 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE. ESPÉCIMEN 1 .....	91
FIGURA 50 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 1, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA .....	92
FIGURA 51 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 1, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA.....	92
FIGURA 52 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 1, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA .....	92
FIGURA 53 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE. ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA .....	93
FIGURA 54 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 2, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA .....	94
FIGURA 55 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 2, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA.....	94
FIGURA 56 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 1, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA .....	94

FIGURA 57 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE. ESPÉCIMEN 3. ELABORACIÓN PROPIA .....	95
FIGURA 58 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 3, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA.....	96
FIGURA 59 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 3, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA .....	96
FIGURA 60 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 3, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE .....	96
FIGURA 61 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE. ESPÉCIMEN 4. ELABORACIÓN PROPIA .....	97
FIGURA 62 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 4, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA.....	98
FIGURA 63 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 4, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA.....	98
FIGURA 64 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 4, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE .....	98
FIGURA 65 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE. ESPÉCIMEN 5. ELABORACIÓN PROPIA. ....	99
FIGURA 66 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 5, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA.....	100
FIGURA 67 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 5, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA .....	100
FIGURA 68 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 5, SOMETIDO A COMPRESIÓN SIMPLE .....	100
FIGURA 69 ESFUERZO DESVIADOR DE CADA ESPÉCIMEN ENSAYADO A COMPRESIÓN SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA.....	101
FIGURA 70 ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA. ESPÉCIMEN 6. ELABORACIÓN PROPIA .....	103
FIGURA 71 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 6, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA.....	104
FIGURA 72 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 6, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA .....	104
FIGURA 73 DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 6, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA .....	104
FIGURA 74 ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA. ESPÉCIMEN 6A. ELABORACIÓN PROPIA.....	105
FIGURA 75 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 6A, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA.....	106
FIGURA 76 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 6A, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA.....	106
FIGURA 77 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 6A, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA.....	106
FIGURA 78 ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA. ESPÉCIMEN 7 .....	107

FIGURA 79 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 7, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA.....	108
FIGURA 80 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 7, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLIC. ELABORACIÓN PROPIA.....	108
FIGURA 81 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 7, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA .....	108
FIGURA 82 ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA. ESPÉCIMEN 8 .....	109
FIGURA 83 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 8, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA.....	110
FIGURA 84 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 8, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA .....	110
FIGURA 85 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 7, SOMETIDO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA .....	110
FIGURA 86 ESFUERZO DESVIADOR DE CADA ESPÉCIMEN ENSAYADO A COMPRESIÓN CÍCLICA. ELABORACIÓN PROPIA.....	111
FIGURA 87 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. ESPÉCIMEN 1. ELABORACIÓN PROPIA .....	113
FIGURA 88 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 1, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	114
FIGURA 89 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 1, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	114
FIGURA 90 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 1, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA .....	114
FIGURA 91 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. ESPÉCIMEN 2. ....	115
FIGURA 92 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. ESPÉCIMEN 2. ELABORACIÓN PROPIA .....	116
FIGURA 93 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 2, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	116
FIGURA 94 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 2, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	116
FIGURA 95 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. ESPÉCIMEN 3. ELABORACIÓN PROPIA .....	117
FIGURA 96 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 3, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	118
FIGURA 97 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 3, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	118
FIGURA 98 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 3, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA .....	118
FIGURA 99 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. ESPÉCIMEN 4. ELABORACIÓN PROPIA .....	119
FIGURA 100 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 4, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	119



PROPIA.....	120
FIGURA 101 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 4, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA .....	120
FIGURA 102 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 4, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA .....	120
FIGURA 103 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. ESPÉCIMEN 5. ELABORACIÓN PROPIA .....	121
FIGURA 104 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 5, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	122
FIGURA 105 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 5, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA .....	122
FIGURA 106 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 5, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	122
FIGURA 107 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. ESPÉCIMEN 6. ELABORACIÓN PROPIA .....	123
FIGURA 108 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 6, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	124
FIGURA 109 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 6, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA .....	124
FIGURA 110 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 6, SOMETIDO A TRACCIÓN INDIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	124
FIGURA 111 RESISTENCIA MÁXIMA ALCANZADA POR CADA ESPÉCIMEN SOMETIDO A TRACCIÓN. ELABORACIÓN PROPIA .....	125
FIGURA 112 CRITERIOS ESTABLECIDOS PARA OBTENER LA COHESIÓN Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DEL MICROCONCRETO ESTUDIADO POR EL MÉTODO DE LA EQUIVALENCIA DE ÁREAS DE HOEK&BROWN. ELABORACIÓN PROPIA .....	126
FIGURA 113 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LINEALIZACIÓN DEL CRITERIO DE HOEK&BROWN MEDIANTE EL MÉTODO DE LA EQUIVALENCIA DE ÁREAS. ELABORACIÓN PROPIA .....	127
FIGURA 114 ESPÉCIMEN 10. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	129
FIGURA 115 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 10. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA. ....	130
FIGURA 116 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 13. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA..	131
FIGURA 117 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 13. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA. ....	132
FIGURA 118 ESPÉCIMEN 11, ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	133
FIGURA 119 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 11. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA. ....	134
FIGURA 120 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 11. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA..	135
FIGURA 121 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 11. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	136
FIGURA 122 ESPÉCIMEN 12, ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	137

FIGURA 123 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 12. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	138
FIGURA 124 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 12. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA..	139
FIGURA 125 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 12. ENSAYO LOCATI.	
ELABORACIÓN PROPIA .....	140
FIGURA 126 ESPÉCIMEN 13, ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	141
FIGURA 127 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 13. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	142
FIGURA 128 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 13. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA..	143
FIGURA 129 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 13. ENSAYO LOCATI.	
ELABORACIÓN PROPIA .....	144
FIGURA 130 ESPÉCIMEN 14, ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA .....	145
FIGURA 131 CARGA AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 14. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA. ....	146
FIGURA 132 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 14. ENSAYO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA..	147
FIGURA 133 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 14. ENSAYO LOCATI.	
ELABORACIÓN PROPIA .....	148
FIGURA 134 TENDENCIAS DE ESFUERZOS DE CORTE-ESFUERZOS NORMALES. ESPÉCIMEN 11.	
ELABORACIÓN PROPIA .....	150
FIGURA 135 ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ESPÉCIMEN 11. ELABORACIÓN PROPIA.....	151
FIGURA 136 TENDENCIAS DE ESFUERZOS DE CORTE-ESFUERZOS NORMALES. ESPÉCIMEN 12.	
ELABORACIÓN PROPIA .....	152
FIGURA 137 ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ESPÉCIMEN 12. ELABORACIÓN PROPIA.....	153
FIGURA 138 TENDENCIAS DE ESFUERZOS DE CORTE-ESFUERZOS NORMALES. ESPÉCIMEN 13A.	
ELABORACIÓN PROPIA .....	154
FIGURA 139 ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ESPÉCIMEN 13A. ELABORACIÓN PROPIA. ....	155
FIGURA 140 TENDENCIAS DE ESFUERZOS DE CORTE-ESFUERZOS NORMALES. ESPÉCIMEN 13B.	
ELABORACIÓN PROPIA .....	156
FIGURA 141 ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ESPÉCIMEN 13B. ELABORACIÓN PROPIA .....	157
FIGURA 142 TENDENCIAS DE ESFUERZOS DE CORTE-ESFUERZOS NORMALES. ESPÉCIMEN 14.	
ELABORACIÓN PROPIA. ....	158
FIGURA 143 ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ESPÉCIMEN 14. ELABORACIÓN PROPIA.....	159
FIGURA 144 TENDENCIAS DE ESFUERZOS DE CORTE-ESFUERZOS NORMALES. ESPÉCIMEN 15.	
ELABORACIÓN PROPIA. ....	160
FIGURA 145 ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ESPÉCIMEN 15. ELABORACIÓN PROPIA.....	161
FIGURA 146 TENDENCIAS DE ESFUERZOS DE CORTE-ESFUERZOS NORMALES (VALORES PICO), TODOS LOS ESPECÍMENES. ENSAYO DE CORTE DIRECTO. ELABORACIÓN PROPIA.....	164
FIGURA 147 TENDENCIAS DE ESFUERZOS DE CORTE-ESFUERZOS NORMALES (VALORES RESIDUALES), TODOS LOS ESPECÍMENES. ENSAYO DE CORTE DIRECTO. ELABORACIÓN PROPIA. ....	164
FIGURA 148 ESPÉCIMEN 1. ENSAYO LOCATI CON ULTRASONIDO EN TIEMPOS DE ESPERA A CARGA	

CONSTANTE. ELABORACIÓN PROPIA.....	167
FIGURA 149 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA.....	168
FIGURA 150 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	168
FIGURA 151 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	169
FIGURA 152 ZOOM_ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA.....	169
FIGURA 153 ONDA S, ESPÉCIMEN 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA.....	170
FIGURA 154 ZOOM_ ONDA S, ESPÉCIMEN 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	170
FIGURA 156 ESPÉCIMEN 2. ENSAYO LOCATI CON ULTRASONIDO EN TIEMPOS DE ESPERA A CARGA CONSTANTE. ELABORACIÓN PROPIA.....	173
FIGURA 157 DEFORMACIÓN AXIAL-TIEMPO. ESPÉCIMEN 2. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA.....	174
FIGURA 158 ESFUERZO DESVIADOR-DEFORMACIÓN AXIAL. ESPÉCIMEN 2. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	174
FIGURA 159 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	175
FIGURA 160 ZOOM_ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA.....	175
FIGURA 161 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	176
FIGURA 162 ZOOM_ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 1. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA.....	176
FIGURA 163 TENDENCIAS DE LAS VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO PARA EL ESPÉCIMEN 2 ENSAYADO POR MÉTODO LOCATI. ELABORACIÓN PROPIA.....	178
FIGURA 164 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 2. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	185
FIGURA 165 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 2. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	185
FIGURA 166 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 3. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	186
FIGURA 167 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 3. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	186
FIGURA 168 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 4. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	187

FIGURA 169 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 4. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	187
FIGURA 170 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 5. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	188
FIGURA 171 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 5. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	188
FIGURA 172 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 6. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	189
FIGURA 173 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 6. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA.	189
FIGURA 174 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 7. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	190
FIGURA 175 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 7. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	190
FIGURA 176 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 8. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	191
FIGURA 177 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 8. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	191
FIGURA 178 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 9. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	192
FIGURA 179 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 9. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	192
FIGURA 180 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 10. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	193
FIGURA 181 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 10. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	193
FIGURA 182 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 11. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	194
FIGURA 183 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 11. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	194
FIGURA 184 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 12. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	195
FIGURA 185 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 12. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	195
FIGURA 186 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 13. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	196
FIGURA 187 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 13. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	

.....	196
FIGURA 188 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 14. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	197
.....	197
FIGURA 189 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 14. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	197
.....	198
FIGURA 190 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 15. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	198
.....	198
FIGURA 191 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 15. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	198
.....	199
FIGURA 192 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 16. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	199
.....	199
FIGURA 193 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 16. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	199
.....	200
FIGURA 194 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 17. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	200
.....	200
FIGURA 195 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 17. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	200
.....	201
FIGURA 196 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 18. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	201
.....	201
FIGURA 197 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 18. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	201
.....	202
FIGURA 198 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 19. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	202
.....	202
FIGURA 199 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 19. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	202
.....	203
FIGURA 200 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 20. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	203
.....	203
FIGURA 201 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 20. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	203
.....	204
FIGURA 202 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 21. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	204
.....	204
FIGURA 203 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 21. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	204
.....	205
FIGURA 204 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 22. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	205
.....	205
FIGURA 205 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 22. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	205
.....	205

FIGURA 206 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 23. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	206
FIGURA 207 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 23. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	206
FIGURA 208 ONDA P, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 24. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	207
FIGURA 209 ONDA S, ESPÉCIMEN 1_ESPERA 24. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	207
FIGURA 210 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 2. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	208
FIGURA 211 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 2. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	208
FIGURA 212 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 3. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	209
FIGURA 213 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 3. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	209
FIGURA 214 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 4. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	210
FIGURA 215 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 4. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	210
FIGURA 216 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 5. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	211
FIGURA 217 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 5. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	211
FIGURA 218 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 6. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	212
FIGURA 219 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 6. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	212
FIGURA 220 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 7. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	213
FIGURA 221 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 7. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	213
FIGURA 222 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 8. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	214
FIGURA 223 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 8. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA .....	214
FIGURA 224 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 9. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	

.....	215
FIGURA 225 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 9. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	215
FIGURA 226 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 10. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	216
FIGURA 227 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 10. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	216
FIGURA 228 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 11. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	217
FIGURA 229 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 11. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	217
FIGURA 230 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 12. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	218
FIGURA 231 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 12. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	218
FIGURA 232 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 13. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	219
FIGURA 233 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 13. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	219
FIGURA 234 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 14. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	220
FIGURA 235 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 14. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	220
FIGURA 236 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 15. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	221
FIGURA 237 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 15. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	221
FIGURA 238 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 16. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	222
FIGURA 239 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 16. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	222
FIGURA 240 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 17. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	223
FIGURA 241 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 17. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	223
FIGURA 242 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA18. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	
.....	224

FIGURA 243 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 18. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	224
FIGURA 244 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 19. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	225
FIGURA 245 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 19. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	225
FIGURA 246 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 20. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	226
FIGURA 247 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 20. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	226
FIGURA 248 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 21. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	227
FIGURA 249 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 21. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	227
FIGURA 250 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 22. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	228
FIGURA 251 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 22. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	228
FIGURA 252 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 23. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	229
FIGURA 253 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 23. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	229
FIGURA 254 ONDA P, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 24. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	230
FIGURA 255 ONDA S, ESPÉCIMEN 2_ESPERA 24. ENSAYO LOCATI-ULTRASONIDO. ELABORACIÓN PROPIA	230
FIGURA 256 DEFINICIÓN DEL PROGRAMA UNIVERSAL. (MANUAL DEL USUARIO&REFERENCIA CATS UNIVERSAL)	231
FIGURA 257 VENTANA DE SELECCIÓN DE OBJETOS A ALMACENAR. (MANUAL DEL USUARIO&REFERENCIA CATS UNIVERSAL)	232
FIGURA 258 VENTANA DE DEFINICIÓN DE FASES. (MANUAL DEL USUARIO&REFERENCIA CATS UNIVERSAL)	232
FIGURA 259 SELECCIONES DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS. MANUAL DEL USUARIO&REFERENCIA CATS UNIVERSAL)	232
FIGURA 260 DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN DEL GSI; PARA UN TIPO DE ROCA GENERAL.	234
FIGURA 261 VENTANA PARA SELECCIONAR VALORES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL DE LA ROCA INTACTA.	235



FIGURA 262 GUÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE ALTERACIÓN DEL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK&BROWN, D. (HOEK, CARRANZA TORRES, & CORKUM, 2002).....	236
---	-----

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de una prueba de laboratorio es someter una muestra a las tensiones y deformaciones existentes en el campo real. A partir del comportamiento medido de la muestra de laboratorio estará previsto el comportamiento del elemento en el campo. Por lo tanto, es conveniente utilizar pruebas de laboratorio que simulen las condiciones de campo en la mayor medida posible.

En el presente TEG se realizó el diseño de mezcla correspondiente a microconcreto con resistencia de diseño de 350 kgf/cm<sup>2</sup> y luego fue evaluado mediante la implementación de ensayos de compresión simple, compresión cíclica, tracción indirecta por el método brasileño, corte directo, fatiga acelerada (método LOCATI) y lecturas de pulso ultrasónico. Cada ensayo realizado fue elaborado con la finalidad de cumplir con el objetivo general de este TEG y sus diferentes objetivos específicos.

Los ensayos elaborados para esta investigación, son un aporte importante y de utilidad para dar inicio a investigaciones vinculadas al microconcreto sometido a fuerzas cortantes, cargas cíclicas y de fatiga. Este Trabajo Especial de Grado (TEG) arroja información que permite aclarar experimentalmente la reacción del microconcreto ante la presencia de fuerzas en las direcciones principales, ya que tratándose de un microconcreto de inyección de túneles es sumamente importante que sea evaluado adecuadamente y así poder predecir el comportamiento del mismo y su respuesta ante las condiciones reales de trabajo

# CAPITULO I

## I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El microconcreto es un material sensible al agrietamiento y éste daño puede ocurrir por diversas causas físicas o mecánicas, las estructuras elaboradas con este material se pueden ver afectadas por sobrecargas, asentamientos diferenciales, sismos, incendios y otras causas que originen el deterioro, en el caso particular de las cargas cíclicas y la fatiga, esto se debe a los tiempos de exposición, prolongados o reducidos, y a los niveles de esfuerzo cíclico.

En Venezuela “se ha establecido la costumbre de realizar ensayos destructivos a compresión simple, sobre probetas normalizadas e inferir, a partir de sus resultados, los valores de otras características mecánicas tales como resistencia a la tracción o al corte” (Porrero 2009, pag 243), de acuerdo con lo anterior se sabe que para los ensayos tradicionales se utilizan probetas de concreto sin el efecto de confinamiento. No es común la elaboración de ensayos en muestras de concreto bajo condiciones de confinamiento y con cargas cíclicas, ya que para ejecutar dicho ensayo la muestra debe ser de tamaño real. En tal sentido es importante desarrollar el estudio del desempeño del concreto sometido a fuerzas de confinamiento y de carga axial, para establecer posibles tendencias en el comportamiento general de elementos estructurales.

Para confinar el microconcreto en un laboratorio y estimar la resistencia al corte es necesario aplicar fuerzas en la dirección perpendicular a la altura de la muestra, una forma de lograr este efecto es utilizar el ensayo normalizado de corte utilizado para rocas que genera confinamiento a la muestra y a su vez brinda la facilidad de aplicar fuerza en las direcciones principales. Estos ensayos son los más confiables para determinar las características de tensión-deformación y los parámetros de resistencia al corte del concreto; en ellos se pueden variar las presiones actuantes sobre una muestra de concreto y así crear condiciones que se asemejen a las reales en campo. Adicionalmente, para establecer el comportamiento ante carga cíclica se requieren equipos especiales que permitan la aplicación dinámica de las

cargas y de esta forma estimar el límite de fatiga del material.

Estudiar el comportamiento del microconcreto en las condiciones reales de trabajo en inyecciones de túneles es de suma importancia para poder obtener una comprensión de su trabajo y la integración de modelamiento con matriz de rocas. Los ensayos mencionados arroja una serie de datos que expresan el comportamiento de la muestra sometida a presiones, acciones cíclicas de carga y métodos de ultrasonido comparativos, datos utilizados con el fin de obtener un registro de deformaciones longitudinales de secciones; estas deformaciones juegan un papel esencial en la degradación y rotura del concreto y, en consecuencia, en el comportamiento de muchas estructuras de Ingeniería Civil.

En vista de lo anterior en este Trabajo Especial de Grado se pretende caracterizar el comportamiento del microconcreto inyectado en túneles de galerías de transporte subterráneo. La finalidad es establecer curvas de comportamiento del microconcreto y verificar mediante ensayo el aumento de resistencia inducido, lo cual permitiría cambiar en forma efectiva la filosofía de diseño de estos concretos.

## **I.2 MARCO REFERENCIAL**

El comportamiento en fatiga de materiales se ha desarrollando extensamente en el área de materiales metálicos y polímeros, en lo que a concreto se refiere se han realizado algunas investigaciones relacionadas a la denominación del límite de fatiga, siendo un tema menos estudiado que en los metales.

El Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria (Carrascal, Casado, Diego, & Polanco) realizó una investigación con el propósito de valorar la influencia que supone utilizar áridos reciclados en el comportamiento a fatiga de hormigones elaborados con ellos, con el objetivo final de proponer un grado de sustitución óptimo a la hora de diseñar hormigones de aplicación estructural. En este trabajo, se estudiaron reemplazos del 0% (Hormigón patrón), 20%, 50% y 100% del árido grueso natural calizo, de un hormigón convencional, por áridos gruesos reciclados. La técnica experimental utilizada se desarrollo a partir de la propuesta por LOCATI. En cuanto a los resultados obtenidos, en primer lugar, encontraron una mejora en las resistencias a compresión y el módulo elástico dinámico de los hormigones con mayor grado de sustitución, encontrándose que para el caso de los hormigones con sustitución total de árido reciclado, la rigidez se ve reducida y la resistencia frente a cargas cíclicas aumenta. Dentro de los análisis descritos en esta investigación se indica que dentro de sus resultados obtenidos por el método LOCATI la deformación máxima aumenta progresivamente dentro de cada uno de los escalones, siendo ésta cada vez más pronunciada a medida que aumenta el escalón o nivel de carga. A demás recomiendan particularmente, que se debe prestar atención al último de los escalones ya que en todos los demás el máximo de deformación, a lo largo de los ciclos, forma una curva, más o menos lineal y poco pronunciada que, como los anteriores escalones, acaba estabilizando.

Otro estudio realizado por ROCIO CELESTE SERRANO MITRE VALDIVIA (Serrano Mitre Valdivia, 2006), en el cual se estudió el comportamiento de probetas cilíndricas de hormigón bajo la acción de cargas cíclicas aplicadas

diametralmente. En cada probeta ensayada se determinó la cantidad de ciclos soportados para una carga específica, registrando además su deformación. Con los resultados obtenidos se obtuvo el comportamiento de las probetas frente a estos factores y se comparó con el ensayo a fatiga más comúnmente utilizado, la fatiga por flexo-tracción. Finalmente se verificó si el método describe el comportamiento de fatiga del hormigón y si podría ser útil para utilizarlo directamente en pavimentos rígidos.

Otra investigación relacionada con el comportamiento ante la fatiga en concreto fue el realizado por Mónica de los Ángeles Boada Marcano y Edwin Leonardo Pérez Niel (Boada & Pérez, 2011) en su estudio “Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas”. En este estudio se utilizaron fibras industriales (polipropileno) y reciclables (bolsas de leche y caucho) en porcentajes óptimos de adición a un concreto aplicando modelos empíricos de fatiga. Basados los resultados y comparando con un concreto tradicional, se obtuvo que con el uso de fibras de polipropileno se reduce considerablemente el espesor, sobre todo en tráficos bajos y suelos con módulo de elasticidad mayores a 50 MPa. De la misma manera ocurre para las otras adicciones de fibras pero en menor relación que las fibras industriales, lográndose un mayor beneficio costo, el cual es proporcional a la reducción de espesores.

## **I.3 OBJETIVOS**

### **I.3.1. Objetivo General**

Caracterizar el comportamiento del microconcreto utilizado para la inyección de túneles de líneas de transporte subterráneo.

### **I.3.2. Objetivos Específicos**

Elaborar curvas típicas de tensión-deformación del microconcreto.

Analizar la resistencia a corte del microconcreto en estado confinado.

Analizar la resistencia a tracción del microconcreto mediante ensayo normalizado y en probetas reducidas.

Analizar la velocidad de pulso ultrasónico en probetas de microconcreto sometida a distintos estados de carga.

Generar información experimental sobre el comportamiento del microconcreto sometido a acciones de carga cíclica.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### II.1 EL CONCRETO COMO MATERIAL

El autor Joaquín Porrero en su “Manual Del Concreto Estructural” (pág. 31) define el concreto como “un material que se puede considerar constituido por dos partes: una es un producto pastoso y moldeable, que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo, y la otra son trozos pétreos que quedan englobados en esa pasta”. Perles en su libro “Hormigón Armado” (pág. 1) lo caracteriza como “una mezcla compuesta por una pasta adhesiva de cemento portland y agua, que mantiene ligadas a las partículas de materiales inertes, compuestos por agregados finos y gruesos. La Norma COVENIN 337 define el concreto como: “Es la mezcla constituida por el cemento, agregados inertes (finos y gruesos) y agua en proporciones adecuadas para que se obtengan las resistencias prefijadas”.

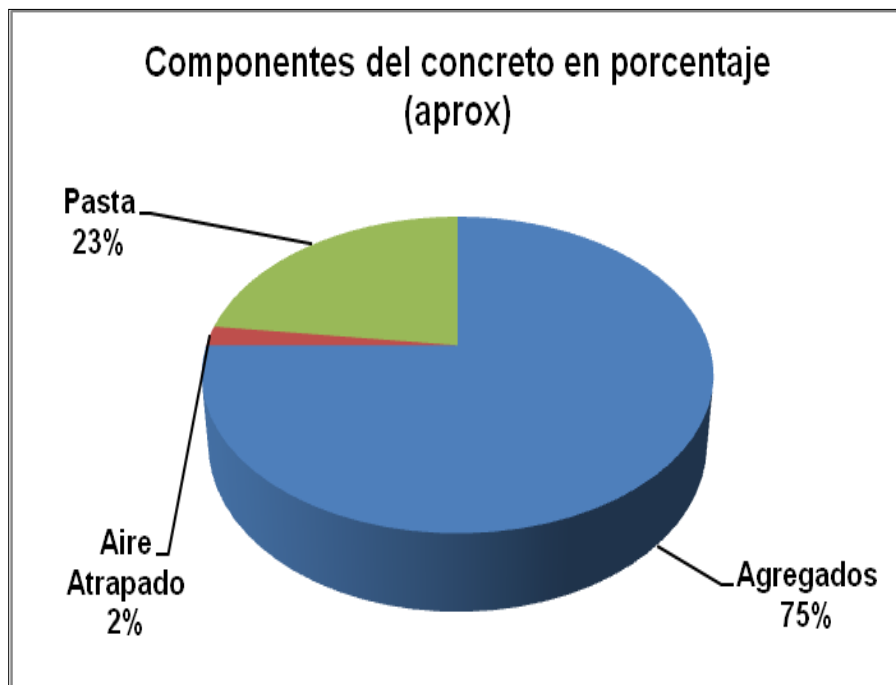


Figura 1 Porcentaje de los componentes del concreto. (Caviedes, 2005)



### II.1.2. Aire atrapado

“Aire que no llega a escapar de la mezcla, predominantemente en forma de burbujas planas, aun con una adecuada compactación del concreto”. (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009, pág. 448)

### II.1.3. Agregados

“Material granular, generalmente inerte, natural o no, el cual se mezcla con cemento hidráulico y agua para producir morteros y concretos”. (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009, pág. 448)

## II.2 RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que tiene mayor influencia en los fines estructurales para los cuales se emplea. “Las resistencias mecánicas del concreto se deben al cemento, pero están condicionadas de modo decisivo por la calidad y proporciones de los restantes materiales componentes de la mezcla” (Porrero 2009, pag 243).

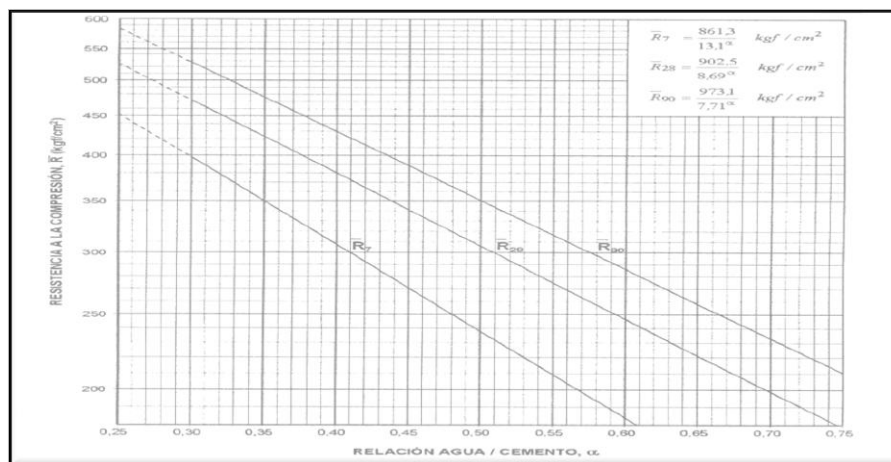


Figura 2 Resistencia mecánica del concreto. (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009, pág. 244)

“Se ha establecido la costumbre de realizar el ensayo destructivo a compresión simple, sobre probetas normalizadas e inferir, a partir de sus resultados, los valores de otras características mecánicas tales como resistencia a la tracción o al

corte”. “La resistencia potencial del concreto se determina, entonces, siguiendo un procedimiento normalizado y su valor es tomado como referencia de calidad” (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009, pág. 243)

La resistencia al corte “tiene gran importancia en los aspectos estructurales pero, debido a que no suele actuar sola, en el cálculo se suelen utilizar diferentes fórmulas para estimarla en forma indirecta, según las sollicitaciones a que este sometido el elemento. Los ensayos de corte no son sencillos ni habituales”. (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009, pág. 256). “La resistencia de un concreto se determina al conocer los resultados de ensayos válidos, sobre un conjunto de probetas normalizadas, en una fecha determinada y siguiendo un procedimiento establecido” (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009, pág. 245).

En Venezuela la norma indica que las probetas deben ser cilíndricas y de 15 cm de diámetro y 30 de altura. La experiencia de gran variedad de investigaciones ha demostrado que el desarrollo de la resistencia mecánica depende de varias variables y resultan diferentes entre unos y otros concretos. Las variables más importantes de acuerdo con Porrero son:

### **II.2.1. Relación agua/cemento**

Perles Pedro (2005) indica que “La resistencia viene dada básicamente por los geles de cemento, producto de la hidratación. Por lo tanto, será conveniente que haya el mayor volumen de ellos, lo que se consigue cuando el agua es aproximadamente el 40%, cantidad necesaria para lograr la hidratación de todo el cemento”. “Se deduce entonces que a mayor cantidad de agua, habrá menor volumen de geles de cemento y por lo tanto menor volumen resistente.

En Venezuela la Ley de Abrams establece la correspondencia entre la resistencia del concreto y la relación agua/cemento, en peso, se simboliza como “valor  $\alpha$ ” y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{a}{C} \quad (2.1)$$

Donde:

$a$  representa la cantidad de agua en litros o en kilogramos fuerza (kgf)

$C$  representa la dosis de cemento en kilogramos fuerza (kgf)

## II.2.2. Composición y finura del cemento

La composición química de un clinker portland se define principalmente por la identificación de cuatro compuestos principales:

Tabla 1 Componentes mineralógicos del cemento Portland  
(Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, pág. 92)

Componente	Formula Química	Formula Abreviada
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} - \text{SiO}_2$	C3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} - \text{SiO}_2$	C2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Ferrialuminato tetracálcico	$4\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O} - \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4FA

Los silicatos de calcio son los compuestos más deseables, porque al hidratarse forman los silicatos hidratados de calcio (S-H-C) que son responsables de la resistencia mecánica y otras propiedades del concreto. Normalmente, el C3S aporta resistencia a corto y mediano plazo, y el C2S a mediano y largo plazo, es decir, se complementan bien para que la adquisición de resistencia se realice en forma sostenida.

El aluminato tricálcico es tal vez el compuesto que se hidrata con mayor rapidez, y por ello propicia mayor velocidad en el fraguado y en el desarrollo de calor de hidratación en el concreto.

El ferroaluminato tetracalcico es un compuesto relativamente inactivo pues contribuye poco a la resistencia del concreto, y su presencia es útil como fundente durante la calcinación del clinker y favorece la hidratación de los otros compuestos.

Conforme a esas tendencias de carácter general, durante la elaboración del clinker portland en sus cinco tipos normalizados, se realizan ajustes para regular la presencia de dichos compuestos de la siguiente manera:

Tabla 2 Tipos de cemento Portland, según COVENIN 28 y ASTM C150

Tipo	Características	Límites de la composición usual promedio %			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> FA
I	Uso general	40-55	25-30	8-15	5-10
II	Resistente a los sulfatos y bajo calor de hidratación	40-50	25-35	8	10-15
II	Altas resistencias iniciales	50-63	15-20	3-15	8-12
IV	Muy bajo calor de hidratación	25-35	40-50	< 7	10-15
V	Muy alta resistencia a los sulfatos	32-42	38-48	< 5	10

Otro aspecto importante relativo a la composición química del clinker (y del cemento portland) se refiere a los álcalis, óxidos de sodio (Na<sub>2</sub>O) y de potasio (K<sub>2</sub>O), cuyo contenido suele limitarse para evitar reacciones dañinas del cemento con ciertos agregados en el concreto. Esto ha dado motivo para el establecimiento de un requisito químico opcional, aplicable a todos los tipos de cemento portland, que consiste en ajustar el contenido de álcalis totales, expresados como Na<sub>2</sub>O, a un máximo de 0.60 por ciento cuando se requiere emplear el cemento junto con agregados reactivos.

Tabla 3 Óxidos Químicos Del Cemento Portland.  
(Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009)

Componente	Formula química	Fórmula abreviada	Límites de la composición usual promedio, %
Sílice	SiO <sub>2</sub>	S	19-25
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3,5-8
Oxido de hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	2,5-4,5
Cal	CaO	C	62-65
Sulfatos (yeso)	SO <sub>3</sub>	Y	1,5-4,5
Magnesia	MgO	M	0,5-5
Álcalis	Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	N, K	0,2-1,2

Tabla 4 Propiedades De Los Componentes Mineralógicos Del Cemento.  
(Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009)

Componente	Propiedades
C <sub>3</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Altas resistencias iniciales</li> <li>– Alto calor de hidratación</li> </ul>
C <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Desarrollo lento de resistencias</li> <li>– Moderado calor de hidratación</li> </ul>
C <sub>3</sub> A	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Muy rápido desarrollo de resistencias</li> <li>– Muy alto calor de hidratación</li> <li>– Gran sensibilidad a los agresivos químicos (sulfatos)</li> </ul>
C <sub>4</sub> FA	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Útil para la formulación de clinker (fase líquida)</li> </ul>
Adiciones: Escoria Siderúrgica Puzolanas Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Desarrollo lento de resistencia</li> <li>– Bajo calor de hidratación</li> <li>– Buena resistencia a la agresión química</li> </ul>

Finura del cemento. El grado de finura del cemento tiene efectos ambivalentes en el concreto. Al aumentar la finura el cemento se hidrata y adquiere resistencia con más rapidez, y también se manifiesta mayor disposición en sus partículas para mantenerse en suspensión en la pasta recién mezclada, lo cual es ventajoso para la cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua en las mezclas de concreto. Como contrapartida, una finura más alta representa mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, cuyas consecuencias son indeseables porque se traducen en mayores cambios volumétricos del concreto y posible agrietamiento en las estructuras.

### II.2.3. Calidad de los agregados

Un 80% (aproximadamente) del peso del concreto está compuesto por partículas de diferentes tamaños, denominadas mayormente como agregados, por esta razón las cualidades y características de estos son determinantes en la calidad del concreto. “Las características de los agregados empleados deberán ser aquellas que beneficien el desarrollo de ciertas propiedades en el concreto, entre las cuales destacan: la trabajabilidad, las exigencias del contenido de cemento, la adherencia con la pasta y el desarrollo de resistencias mecánicas”. En la Norma COVENIN 1753, en su artículo 3.3 se indican las características que deben cumplir los agregados; en el comentario de esa Artículo (C-3.3) se autoriza el uso de

agregados que no cumplen con el Artículo 3.3 de la forma siguiente: “En algunas circunstancias, materiales que no cumplen con las especificaciones tienen una larga historia de comportamiento satisfactorio. Cuando exista evidencia aceptable sobre ese buen comportamiento, tales materiales se permitirán siempre que se cuente con una aprobación especial del Ingeniero Inspector”. (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009)

#### **II.2.4. Temperatura Ambiental**

Factor externo que afecta la reología (fluidez, compatibilidad y estabilidad a la segregación) de manera importante, el concreto se hace menos fluido a medida que aumenta la temperatura, debido a que ese calor acelera las reacciones de fraguado y endurecimiento. (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009)

#### **II.2.5. Curado**

Es “el proceso de mantener o reponer la humedad que pudiera perder el material por evaporación del agua, necesaria esta para que se desarrollen las relaciones de hidratación del cemento”.

### **II.3 MICROCONCRETO**

La mezcla elaborada a partir de una composición adecuada entre fragmentos de granos pétreos que provienen de roca (agregados finos, aquel que pasa el cedazo #4 y es retenido en el cedazo #200. (COVENIN 273,1998)), agua y cemento se puede clasificar con el nombre de microconcreto.

En el caso de estudio de este TEG la mezcla denominada microconcreto está constituida por arena y arcillo N° 0 como agregado fino, agua y cemento. Las proporciones entre estos componentes se determinan a partir de la resistencia deseada.

#### **II.3.1. Cemento**

El cemento es un material que se obtiene a partir de materias primas que son abundantes en la naturaleza. Tales como la piedra caliza, arenas silíceas, esquistos y mineral de hierro entre otros. A los cuales, es preciso someter a un

arduo proceso industrial que entre otras cosas, incluye varias moliendas para alcanzar un alto grado de finura, cocción a altas temperaturas en hornos especiales, control estricto en todo el proceso y por último, cuidados ambientales necesarios para impedir la contaminación de las zonas adyacentes a la industria procesadora de la materia prima.

Como es lógico pensar, para obtener ese material de color característico gris, se requiere de una gran inversión; sin embargo, a pesar del arduo proceso necesario para su obtención, no es un producto que pareciera ser muy caro; puesto que es el material más utilizado en nuestro país en la industria de la construcción.

El cemento posee muchas características; pero una de las más importantes, se produce cuando al mezclarse con una cierta cantidad de agua, forma una pasta aglomerante que tiene propiedades adhesivas y cohesivas; lo cual le permite, junto al agua y los agregados formar parte de otro material denominado concreto el cual es muy utilizado en nuestro medio. La función principal del cemento en la mezcla es otorgarle a la misma, fluidez y lubricación en estado fresco y la resistencia adecuada una vez que el concreto ha fraguado. En el mercado existen varios tipos de cemento los cuales poseen ciertas características que los diferencian entre sí. El más conocido es el cemento tipo Portland.

El cemento Portland, es el producto obtenido de la pulverización del Clinker Portland, cuando se ha enfriado, este Clinker se muele con una reducida porción de yeso, el cual tiene la función de regular el tiempo de fraguado. A su vez, se puede triturar con otros materiales como puzolana, alúmina, etc. (Tabla 1 Componentes mineralógicos del cemento Portland, Tabla 2 Tipos de cemento Portland, según COVENIN 28 y ASTM C150, Tabla 3 Óxidos Químicos Del Cemento Portland.).

### **II.3.2. Agua de mezclado**

Al igual que el cemento, la función principal del agua en la mezcla, es otorgarle a la misma trabajabilidad, lubricación y resistencia. Para lograr que el agua cumpla con estas funciones dentro de la mezcla, la cantidad de este componente debe ser

calculada de la manera más exacta posible; pues al concreto, no debe faltarle ni sobrarle agua. De lo contrario, las mezclas elaboradas podrían quedar muy secas y poco trabajables o muy fluidas y altamente segregables. Es por ello, que la cantidad de agua y de los demás componentes del microconcreto, se calcula a través del diseño de mezcla.

El agua utilizada para el desarrollo de este trabajo debe ser potable según la Norma COVENIN<sup>1</sup> 2385-86 la cual es suministrada por HIDROCAPITAL a través de su red de distribución; cabe destacar que no es recomendable el uso de agua no potable, pues eso podría influir en los resultados de los ensayos elaborados.

El agua de mar no debe ser utilizada por ningún motivo, pues ataca a la resistencia del concreto y corroe el acero de refuerzo en el caso de que lo hubiere. Al mismo tiempo, las aguas de procedencia dudosa, deben ser sometidas a análisis físicos y químicos tal como lo indica la Norma antes citada para determinar su composición y de esta forma, decidir si puede ser usada o no en la elaboración del microconcreto. Por lo tanto, para evitar estos múltiples inconvenientes que podrían encarecer el trabajo por la cantidad de estudios que se deben realizar, lo más práctico y conveniente es usar el agua potable en las cantidades adecuadas.

### **II.3.3. Agregado**

La calidad de este material es muy importante, pues el mismo cumple ciertas funciones dentro de la mezcla. Estas funciones, entre otras, son la reducción de costos y aporte de resistencia a la mezcla. Para garantizar su calidad, es necesario hacerle al agregado una serie de estudios normativos.

En este caso, los agregados finos deben ser sometidos a una serie de pruebas tales como la granulometría, peso específico, absorción, partículas en suspensión, etc. que como es sabido incrementan el costo de la obra. Es por ello, que por lo general, se prescinde de muchos de estos estudios cuando la cantera de donde se

---

<sup>1</sup> COVENIN: Comisión Venezolana de Normas Industriales

<sup>2</sup> Instituto de Materiales y Modelos Estructurales.



extrae el material está en una zona donde hay experiencia en el saque y su calidad, ya ha sido comprobada en la elaboración de concretos. Sin embargo cuando el origen del agregado es desconocido es preciso hacer los estudios necesarios para comprobar su calidad.

### II.3.3.1. Granulometría

La granulometría sirve para determinar la distribución del tamaño de los granos que componen a un determinado agregado. Este estudio consiste en hacer pasar una muestra representativa del agregado por una serie de cedazos los cuales poseen un número que indica la abertura de cada tamiz y que se colocan en cascada, uno sobre otro, con el de mayor abertura arriba y los de menor abajo. Para esta investigación se usan los tamices siguientes: 3/8", 1/4", #4, #8, #16, #30, #50, #100 y el fondo.

Este grupo de tamices se coloca en una tamizadora eléctrica (COVENIN 255), durante el tiempo necesario para lograr la separación. Transcurrido el tiempo fijado, se separan cada uno de los cedazos y se pesa su contenido para determinar el porcentaje de retenido y el porcentaje de pasante de cada uno.

Con los datos anteriores, se procede al trazado de la curva granulométrica para ver gráficamente la distribución del agregado por tamices. Los límites granulométricos normativos se muestran en la Tabla 5

Tabla 5 Límites granulométricos del agregado fino.  
(NORMA COVENIN 277)

Cedazos	Porcentaje de pasante
	%
3/8"	100
1/4"	92-100
# 4	85-100
# 8	60-95
# 16	40-80
# 30	20-60
# 50	8-30
# 100	2-10
Fondo	0-5

### **II.3.3.2. Tamaño Máximo**

El tamaño máximo se refiere al menor cedazo que deje pasar el 95 % o más de la muestra del agregado en estudio, yendo de los más finos hacia los más gruesos. El tamaño máximo influye en la resistencia del concreto debido a que los niveles de resistencia más altos se obtienen con tamaños máximos pequeños y dosis altas de cemento.

### **II.3.3.3. Segregación del agregado**

La segregación ocurre en los agregados cuando los granos que lo componen tienen mucho contraste entre sí, esto induce a su separación. Cuando no están bien mezclados, esto se nota en los de mayor tamaño que tienden a dispersarse, es importante antes de hacer una mezcla, mezclar bien el agregado fino para tener una muestra realmente representativa.

### **II.3.3.4. Porcentaje de absorción**

El porcentaje de absorción es el porcentaje de agua que puede absorber un agregado seco para pasar a la condición de saturado con superficie seca. Este fenómeno es capaz de quitarle agua a la mezcla con lo que la relación agua/cemento se afecta y por lo tanto, la mezcla se altera a tal punto que puede convertirse en una mezcla poco trabajable.

Es por esto, que una vez determinado este valor según se indica en la Norma COVENIN 268- se procede a realizar la corrección de agua en el diseño de mezcla; y así, usar solamente el agua necesaria para garantizar la condición de saturado con superficie seca.

$$Abs = \left( \frac{W - W_1}{W_1} \right) * 100 \quad (2.2)$$

Donde:

*Abs* , porcentaje de absorción del agregado

*W* , es el peso de la muestra ensayada en condición de saturada con superficie seca. En gramos.

$W_1$ , es el peso de la muestra  $W$  secada al horno a temperatura constante de 110 °C durante 24 horas

#### **II.3.3.5. Peso específico**

El peso específico del agregado o densidad se usa para establecer la condición del volumen en el diseño de mezcla. Se determina con la siguiente ecuación:

$$\gamma_s = \frac{W}{W_a + W - W_p} \quad (2.3)$$

Donde:

$W$ , es el peso de la muestra ensayada en condición de saturada con superficie seca. En gramos

$W_a$ , peso del picnómetro lleno de agua en gramos.

$W_p$ , peso del picnómetro lleno de agua y con la muestra ensayada en gramos.

#### **II.3.3.6. Agregado saturado con superficie seca**

Como se dijo anteriormente, la condición de saturado con superficie seca ocurre cuando los poros del agregado están saturados de agua y su superficie está seca; de tal manera que al añadir el agua a la mezcla, esta no se altera con exceso o déficit de agua. Para realizar el diseño de mezcla, se asume que el agregado empleado está en esta condición; pero se debe corregir el mismo por humedad para aportar a la mezcla el agua estrictamente necesaria.

#### **II.3.3.7. Humedad del agregado**

La humedad es la cantidad de agua que un agregado fino o grueso posee y que se obtiene de la diferencia entre una porción del agregado húmedo y la misma porción del agregado, pero secada al horno, a temperatura constante de aproximadamente 110° C y durante 24 horas. Este valor se expresa como porcentaje en peso referido al material seco. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$h = \left( \frac{Pmh - Pms}{Pms} \right) * 100 \quad (2.4)$$

$Pmh$ , es el peso de la muestra en estado húmedo.

$Pms$ , es el peso de la muestra secada al horno durante 24 horas a temperatura constante de 110 °C.

En los agregados, la humedad se aloja en los poros y microporos internos de los granos de la arena, también se presenta como una película que recubre los granos. La determinación de la humedad es importante, porque el agua que forma una película en torno a los granos del agregado al momento de la mezcla, pasa a formar parte de la misma; y por lo tanto, altera la cantidad de agua con lo cual se tienen distorsiones que afectan la relación agua/cemento y la resistencia del concreto.

Del mismo modo, si un agregado está muy seco, al hacer las mezclas con una cierta cantidad de agua sin haberse tomado en cuenta la humedad, ocurre que el agregado va a absorber parte de esa agua y se tendrá una mezcla seca y poco trabajable. El equilibrio ocurre cuando el agregado tiene la condición de saturado con superficie seca, en la que todos los poros están saturados de agua y su superficie está seca; por lo que al añadir el agua de mezclado, el agregado no absorberá ni aportará agua a la mezcla y no alterará ni su relación agua-cemento ni su resistencia.



Figura 3 Distintas condiciones de humedad de los agregados (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009, pág. 82)

### **II.3.3.8. Ajuste de la cantidad de agua**

La cantidad de agua se ajusta una vez que se ha determinado la humedad en la muestra de arena. Con este ajuste, lo que se busca es llevar el agregado a la condición de saturado con superficie seca.

El ajuste se realiza con la siguiente ecuación:

$$A_{corr} = A_{sss} + (P_{sss} - P_h) \quad (2.5)$$

Donde:

$A_{corr}$ , es la Dosis definitiva de agua por m<sup>3</sup>

$A_{sss}$ , es la Dosis de agua por m<sup>3</sup> para el agregado s.s.s

$P_{sss}$ , es el Peso del agregado en condición de s.s.s.

$P_h$ , es el Peso del agregado en estado húmedo

## **II.4 ASPECTOS GENERALES DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MICROCONCRETO EN ESTADO FRESCO**

Durante el estado de fluidez del microconcreto se pueden considerar una serie de características físicas que permiten predecir el comportamiento que tendrá la mezcla en su estado endurecido, de la misma forma que se hace con una mezcla de concreto. Algunas de estas características se explican a continuación.

### **II.4.1. Trabajabilidad**

La misma se puede definir como la mayor o menor resistencia que ofrece el microconcreto en estado fresco para ser mezclado, transportado y colocado en el molde definitivo sin que se produzca segregación. La Trabajabilidad se mide a través del asentamiento del concreto, el cual es medido por el procedimiento normalizado del Cono de Abrams.

### **II.4.2. Asentamiento**

El asentamiento es una medida de la trabajabilidad del microconcreto. En términos más sencillos, es una medida de su fluidez. Se mide a través del cono de Abrams

colocando el molde a un lado del cono de microconcreto elaborado y tomando la diferencia de altura entre los dos. Mientras más asentamiento se tiene, el microconcreto tiene más fluidez; por lo que se podría decir que, asentamientos altos están asociados a concretos más fluidos y asentamientos bajos inducen a concretos poco fluidos.

#### II.4.2.1. Cono de Abrams

Es un equipo utilizado en el laboratorio para medir el asentamiento T de una mezcla cualquiera. El mismo, es un cono truncado cuya forma y dimensiones están normalizadas por la Norma COVENIN 339-79. Por medio del cono se obtiene el asentamiento de las mezclas; las cuales, al ser retirado el cono, se desmoronan por gravedad ofreciendo información muy útil sobre su trabajabilidad.

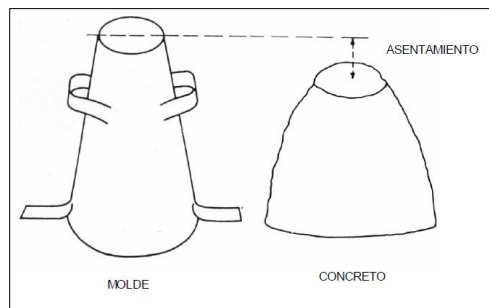


Figura 4 Medición del asentamiento (COVENIN. 339.)

Su uso es muy práctico y fácil, pero hay que decir también que su uso se limita a medir asentamientos en concretos con agregados normales y que tengan plasticidad, pues estos suelen tener asentamientos entre 2cm y 17cm. Además la masa desmoldada suele ser simétrica y con la superficie superior plana. En cambio, los concretos pedregosos, al ser retirado el cono, presentan una masa caída hacia un lado.

#### II.4.3. Segregación del microconcreto

El microconcreto es un material más homogéneo que el concreto pues el agregado que lo compone es fino. En cambio, en el concreto el agregado grueso tiende a dispersarse. Sin embargo, en el microconcreto puede ocurrir segregación debido a varias causas que se pueden evitar con un manejo adecuado de la

mezcla y de sus componentes.

Entre las causas más influyentes para que una mezcla se segregue, esta una mala dosificación en la que por lo general, hay un exceso en la cantidad de agua añadida indiscriminadamente para otorgarle fluidez a la mezcla, lo cual produce un lavado de las partículas y hace que las más sólidas y pesadas de la mezcla como los agregados, se separen por efecto del material cementante. La única manera de evitar la segregación es a través de una buena dosificación de los componentes de la mezcla.

#### **II.4.4. Fraguado del microconcreto**

El fraguado es el proceso en el cual, el microconcreto en estado fresco, fluido, se endurece paulatinamente. Es un proceso que ocurre en pocas horas y se inicia en el instante en que se mezclan todos los componentes del microconcreto. En la mezcla, ocurre una reacción química de hidratación que hace que se pierda paulatinamente el estado plástico, lo cual desemboca en el endurecimiento del microconcreto y a largo plazo el desarrollo de resistencia.

#### **II.4.5. Compactación del microconcreto**

La compactación del microconcreto es necesaria para evitar que se produzcan vacíos o cámaras de aire en el molde durante el vaciado de la mezcla. Este proceso se puede realizar de dos formas: mecánico y manual. Como los moldes usados en este trabajo son pequeños, se usa el método manual, el cual consiste en dar un cierto número de golpes al microconcreto con una barra lisa.

La cantidad dada es de 25 golpes cuando la mezcla es vaciada en el molde. Usualmente la mezcla se debe vaciar en tres capas y cada una de ellas debe ser compactada. El otro método es el mecánico, para el cual se utiliza un vibrador. En todo caso, esta forma de compactación se usa cuando el volumen de concreto es mucho mayor y la barra deja de ser efectiva.

### **II.5 RESISTENCIA DEL MICROCONCRETO**

La resistencia del microconcreto, se estudia sometiendo probetas cilíndricas normalizadas a ensayos de compresión. Este ensayo se realiza a la edad de 28

días, contados a partir de la fecha de desencofrado de la probeta. La resistencia adquirida por la muestra, depende en gran manera de la relación agua/cemento. La misma se determina siguiendo un proceso normalizado y su valor se toma como una referencia de calidad de la mezcla elaborada.

$$R = \frac{M}{N^\alpha} \quad (2.6)$$

Donde:

$R$ , es la resistencia promedio a una determinada edad.

$M$  y  $N$ , Son valores que dependen de la edad del concreto, tipo de cemento y las características del agregado.  $\alpha$  ver (2.1)

Durante los 28 días después del desencofrado el concreto debe ser sometido a un proceso de curado. El proceso es muy sencillo, simplemente se debe reponer el agua que se ha evaporado de la mezcla producto de las reacciones exotérmicas que se producen internamente y de las condiciones del medio ambiente. El agua se añade a la superficie del elemento.

### **II.5.1. Curado de las probetas**

El curado es un proceso que tiene mucha importancia, pues mediante esta operación, se evita la pérdida parcial del agua de la mezcla por efecto de la evaporación superficial y de esta manera se garantiza el desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento.

Esta pérdida de agua provoca la aparición de fisuras en el concreto e impide el desarrollo de resistencias. Es por ello, que es necesario curar el microconcreto una vez que ha sido vaciado en el molde definitivo para mejorar sus resistencias mecánicas, aumentar la resistencia al desgaste y a la abrasión.

### **II.5.2. Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas definen la capacidad del material para resistir acciones externas o internas que implican la aplicación de fuerzas sobre el mismo. Esencialmente, estas fuerzas son de compresión, tensión (o extensión), flexión y



de impacto.

### **II.5.3. Criterios Mecánicos de Resistencia y Deformabilidad del microconcreto**

La respuesta y el comportamiento del microconcreto están controlados por sus características físicas y mecánicas, que son el resultado de los diversos procesos del diseño de mezcla hasta el momento en que es intervenido.

Todos estos factores que afectan al microconcreto, deben tomarse en cuenta al momento de diseñar una obra de ingeniería en donde éste deba ser perfectamente estudiado y las características físicas, se pueden cuantificar de una manera aceptable sin embargo surge entonces el problema de cómo se pueden medir o cuantificar las características mecánicas del microconcreto.

Este ha sido por mucho tiempo uno de los principales problemas a los que se le ha tenido que dedicar atención, debido a que cada día los proyectos de ingeniería son más ambiciosos y más exigentes en cuanto a calidad, seguridad y por supuesto en cuanto a menores costos. Se trata simplemente de poder aprovechar mejor las propiedades del microconcreto o poder predecir con mayor exactitud el comportamiento que tendrá el material de acuerdo a la forma en que sea afectado.

Para dar respuesta a este problema, surgieron los llamados criterios de resistencia y rotura aplicados al microconcreto. Pero antes de definir estos criterios, se presentan a continuación una serie de conceptos que facilitarán su entendimiento y comprensión.

#### **II.5.3.1. Fuerzas (*P*)**

Al hablar de fuerzas en microconcreto, debe acotarse que éstas son las principales responsables del estado y comportamiento mecánico del mismo; las fuerzas que actúan sobre el material son la fuerza gravitatoria y las fuerzas superficiales que ejercen sobre el cuerpo los materiales que lo rodean. Estas fuerzas superficiales actúan directamente sobre las superficies de contacto entre las partes adyacentes del microconcreto y se transmiten a cualquier punto del interior del mismo. Las fuerzas superficiales pueden ser compresivas o

distensivas, según actúen hacia dentro o hacia fuera del punto de aplicación.

### **II.5.3.2. Esfuerzo $\sigma$**

Es la reacción interna de un cuerpo a la aplicación de una fuerza o conjunto de fuerzas; es una cantidad que no se puede medir directamente, ya que lo que se mide es la fuerza que se aplica, si la fuerza actúa uniformemente sobre una superficie o un plano, el esfuerzo o tensión indica la intensidad de las fuerzas que actúan sobre ese plano.

Es importante señalar que el esfuerzo sobre un plano no varía si la fuerza es aplicada uniformemente sobre éste, pero si esto no sucede, es decir que la fuerza no se aplica de manera uniforme sobre todo el plano, el esfuerzo variará para las diferentes áreas del mismo. Al igual que las fuerzas, los esfuerzos compresivos son positivos, y los distensivos o traccionales, son negativos.

### **II.5.3.3. Estado de esfuerzos**

Se refiere a la definición y cuantificación de todas las fuerzas por unidad de área que son aplicadas sobre un cuerpo en un momento determinado; generalmente se determina definiendo los esfuerzos que son aplicados sobre tres planos ortogonales a través de un punto

### **II.5.3.4. Deformación, $\epsilon$**

La deformación indica la variación entre la longitud o espacio entre dos partículas en dos estados mecánicos distintos, y se puede expresar como la relación entre la variación de longitud y la longitud inicial entre las partículas. Dicho en otras palabras, la deformación indica el cambio en la forma o configuración de un cuerpo, según los desplazamientos que sufre el microconcreto al soportar la carga.

### **II.5.3.5. Resistencia, $\sigma_c$**

La resistencia es el esfuerzo que el microconcreto puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación. Cuando el microconcreto alcanza su

resistencia máxima se habla de resistencia pico ( $\sigma_p$ ), y si microconcreto sobrepasa esta resistencia pico y cae a otro valor de resistencia para deformaciones elevadas sin que exista rotura de la misma, se llama resistencia residual  $\sigma_r$ .

#### **II.5.3.6. Rotura**

La rotura es un fenómeno que se produce cuando el microconcreto no puede soportar las fuerzas que se le aplican, y el esfuerzo alcanza un valor máximo que corresponde a la resistencia pico del material. Según la resistencia del microconcreto y las relaciones entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas, la rotura puede ser: rotura frágil, en la que la rotura del microconcreto se produce de forma instantánea y violenta; o rotura dúctil, donde la rotura del microconcreto se produce en forma progresiva.

Para el microconcreto existen diferentes mecanismos de rotura, de los cuales se presentan los siguientes:

Rotura por esfuerzo cortante, se produce cuando una determinada superficie del microconcreto se somete a esfuerzos de corte suficientemente altos como para que una cara de la superficie se deslice con respecto a otra; ejemplo, la rotura a favor de discontinuidades.

Rotura por compresión, se produce cuando el microconcreto está sometido a esfuerzos compresivos, y a nivel microscópico se producen en el microconcreto grietas de tracción y planos de corte por donde se producirá la rotura.

Rotura por tracción, se produce cuando la forma o estructura de la muestra de microconcreto hace que una sección del mismo se someta a una tracción pura o casi pura.

#### **II.5.3.7. Fractura**

La fractura es la formación de planos de separación en microconcreto, rompiéndose los enlaces de las partículas para crear nuevas superficies; se pierden las fuerzas cohesivas y permanecen únicamente las fricciones. La

dirección de estos nuevos planos de fractura depende de: la dirección de aplicación de las fuerzas y las anisotropías presentes en el material a nivel microscópico o macroscópico.

#### **II.5.3.8. Cohesión, $C$**

En el microconcreto, la cohesión es la fuerza que une las partículas minerales que conforman microconcreto, o la resistencia al corte cuando la tensión normal es nula, medida en el plano de discontinuidad.

#### **II.5.3.9. Ángulo de fricción interna, $\phi$**

Es el ángulo de rozamiento entre dos planos del mismo microconcreto, o ángulo máximo que resiste antes de producirse el desplazamiento en la dirección de la inclinación.

### **II.5.4 Constantes elásticas "estáticas" de deformación del microconcreto**

Las constantes de deformación de un material son los parámetros más importantes en cualquier diseño y su determinación requiere el uso de técnicas de medición tanto de carga y deformación. A continuación trataremos los diversos instrumentos que se utilizan para la medición de las deformaciones de las muestras de microconcreto.

#### **Definición de términos**

- Un material es llamado elástico cuando se recupera el estado original después de ser sometido a un ciclo de carga descarga.
- La relación entre esfuerzo deformación es representada por constantes llamadas constantes elásticas del material. El microconcreto sometido a compresión tiende a deformarse. Las relaciones entre las tensiones aplicadas y las deformaciones correspondientes se denominan constantes elásticas
- Las constantes elásticas pueden ser obtenidas en laboratorio aplicando gradualmente tensiones y midiendo las respectivas deformaciones,

efectuando luego el cociente entre los valores absolutos.

- Estos cocientes determinan las constantes elásticas "estáticas".
- La constante elástica considerada en este TEG será el Módulo de elasticidad.

#### **II.5.4.1. Módulo de elasticidad o módulo de Young**

El módulo de elasticidad, también denominado módulo de Young, es un parámetro que se obtiene empíricamente a partir de un ensayo denominado ensayo a tracción.

En caso de que tengamos un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young calculado en el ensayo a tracción también resulta válido para los casos en que haya compresión.

El ensayo a tracción estudia el comportamiento de un material sometido a un esfuerzo de tracción progresivamente creciente, ejercido por una maquina apropiada, hasta conseguir la rotura.

El ensayo se efectúa sobre una probeta normalizada, marcada con trazos de referencia, para poder determinar las deformaciones en función de los esfuerzos. Los esfuerzos se definen como:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.7)$$

Siendo

$P$ : carga aplicada sobre la probeta,

$A_0$ : área transversal inicial

Mientras que las deformaciones las definimos como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.8)$$

Con:

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.9)$$

Siendo:

$l$  = longitud correspondiente a una carga determinada y

$l_0$  = longitud inicial (sin carga).

## II.6. CRITERIOS DE ROTURA, RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD

### II.6.1. Criterios de Mohr-Coulomb

El criterio de Mohr-Coulomb es un criterio lineal que expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura.

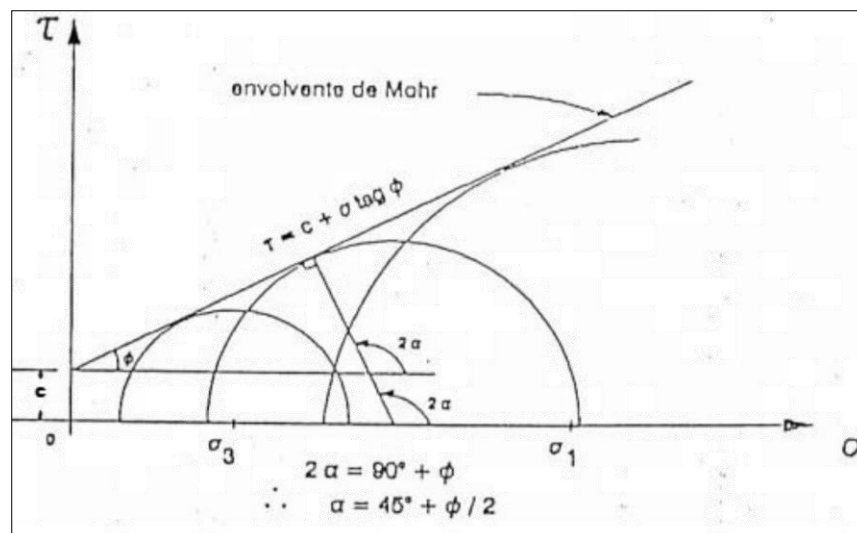


Figura 5 Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. (Melentijevic, 2005)

Expresión matemática:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \phi \quad (2.10)$$

Dónde:

$\tau$  y  $\sigma_n$  son las tensiones tangencial y normal sobre el plano de rotura; y

$c$  y  $\phi$  son la cohesión y el ángulo de fricción de la muestra.

Este criterio también se puede expresar en función de los esfuerzos principales

$\sigma_1$  y  $\sigma_3$ .

$$\sigma_1 = \frac{2c * \cos \phi + \sigma_3 * (1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} \quad (2.11)$$

En condiciones de compresión sin confinar, es decir:

Dónde:

$\sigma_1$  Será la resistencia a la compresión simple de microconcreto  $\sigma_1 = \sigma_c$  de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{(2c * \cos \phi)}{1 + \sin \phi} \quad (2.12)$$

Para condiciones en que una muestra es sometida a tracción, esto es  $\sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_3$  será igual a la resistencia a la tracción  $\sigma_t$  (negativo), y el criterio define para esto la siguiente expresión:

La representación gráfica de los estados de esfuerzos en un punto recibe el nombre de círculo de Mohr; las intersecciones del círculo con el eje  $\sigma_n$  son los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , el radio del círculo representa el máximo esfuerzo tangencial  $\tau$ . Cualquier punto del círculo representa el estado de esfuerzos sobre un plano cuya normal forma un ángulo  $\phi$  con la dirección del esfuerzo principal  $\sigma_1$  aunque para las aplicaciones de la mecánica de roca.

### **II.6.2. Criterio de rotura no lineal de Hoek&Brown**

Este criterio introducido originalmente en el año 1980 fue propuesto principalmente para utilizarse en el cálculo de la estabilidad en taludes y estados tensionales en el entorno de un túnel, para macizos rocosos duros. Motivado a que dicho criterio se generalizo en el tema de la mecánica de rocas, éste ha sufrido varias modificaciones incluyendo la consideración de nuevos parámetros para definir el estado del material, quedando su última versión para el año 2002 (Hoek, 2002).

Como se menciona anteriormente se trata de un criterio no lineal, empírico, que permite valorar de manera sencilla la rotura de un medio rocoso mediante la

introducción de las principales características geológicas y geotécnicas de material.

El criterio original parte de la siguiente expresión:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left( m^* \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (2.13)$$

Donde:

$\sigma_1'$  y  $\sigma_3'$  son las tensiones principales mayor y menor para el momento de rotura.

$\sigma_{ci}$  es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto.

$m$  y  $s$  son constantes del material y dependen de las propiedades de la roca y del grado de fracturación de la roca antes de someterla a las tensiones de rotura. El parámetro  $s$  es la medida de disminución de la resistencia a compresión simple de la roca debido a la fracturación. Por su parte,  $m$  influye en la resistencia al corte del material. Ambos parámetros se pueden obtener a partir de la clasificación geomecánica Rock Mas Rating (RMR), introducida por Bieniawski, 1976.

La siguiente expresión expresa la reformulación del criterio y evidencia la introducción de nuevos parámetros como se mencionó anterior mente:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left( m_b^* \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.14)$$

$m_b$  es un valor reducido de la constante del material  $m_i$  y esta dado por :

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2.15)$$

$GSI$  (Geological Strength Index) la cual es una clasificación geomecánica (Hoek, 1994; Hoek, Kaiser y Bawden, 1995)

$s$  y  $a$  son constantes del macizo rocoso expresadas por las ecuaciones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (2.16)$$



$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{-GS}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (2.17)$$

$D$ , factor que depende del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las excavaciones o por la relajación de esfuerzos. Va desde  $D=0$  para macizos rocosos in situ inalterados hasta  $D=1$  para macizos rocosos muy alterados. Para estimar los posibles valores del factor de alteración  $D$  ver apéndice Figura 262 Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown,  $D$ .

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene haciendo  $\sigma_3' = 0$  en la ecuación (2.14) quedando la expresión:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} * s^a \quad (2.18)$$

Y la resistencia a la tracción:

$$\sigma_t = -\frac{s * \sigma_{ci}}{m_b} \quad (2.19)$$

### **II.6.3. Obtención de la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb a partir de la envolvente de Hoek&Brown.**

Durante el análisis de la estabilidad de un talud rocoso es práctica común la linealización del criterio de rotura de Hoek&Brown para obtener la envolvente de rotura de Morh-Coulomb equivalente. Existen distintos métodos de linealización del criterio de rotura de Hoek&Brown (estudiados por Puell, 2004), para este TEG el método de interés es el siguiente:

#### **II.6.3.1. Método de la equivalencia de áreas.**

Consiste en encajar una recta que equilibre las áreas entre la envolvente de la curva Hoek&Brown y la linealización de Morh-Coulomb para un determinado rango de tensiones. Este método es el aplicado por el programa RocLab (Hoek, 2002).

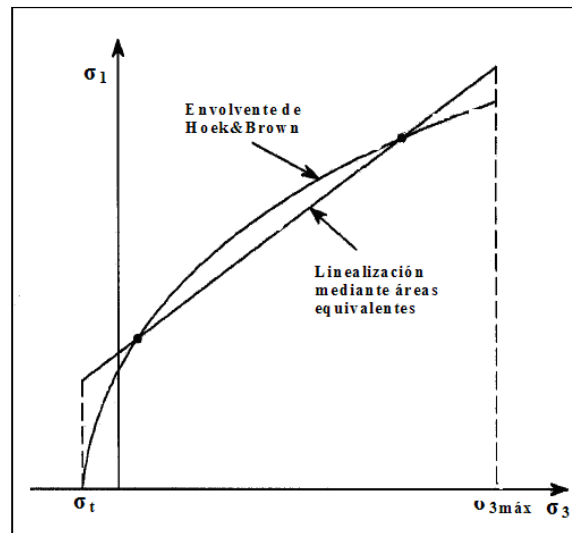


Figura 6 Representación grafica del criterio de Hoek&Browm mediante el método de la equivalencia de áreas.  $\sigma_1, \sigma_3$  son las tensiones principales mayor y menor;  $\sigma_t$  es la resistencia a la tracción;  $\sigma_{3máx}$  es el valor máximo esperado de las tensiones de confinamiento. (Puell, 2004).

## II.7 MICROCONCRETO DE INYECCIÓN PARA TÚNELES

El microconcreto de inyección utilizado durante el proceso de excavación en túneles, no es más que la colocación de una mezcla como relleno entre los espacios vacíos existentes en la dovela y el terreno. Mediante este procedimiento se genera la continuidad del terreno y la dovela. La mezcla utilizada para este fin es la resultante de un diseño de mezcla de concreto elaborado únicamente con agregado fino.

- La mezcla de relleno de inyección debe cumplir las siguientes funciones:
- Reducir los niveles de asentamiento, principalmente en terrenos inestables.
- Evitar el movimiento de las dovelas en el anillo, y por consiguiente la posible rotura de las juntas de éstas.
- Transmitir las cargas rápidamente.
- Reducir o eliminar por completo el ingreso de agua en el túnel.

Esta mezcla se ve sometida a ciclos de carga y descarga que actúan en tiempos muy cortos pero que durante el proceso de construcción del túnel se presentan

continuamente, generándose así un proceso de fatiga, por lo cual se hace necesario la aplicación de una mezcla de microconcreto capaz de resistir procesos de fatiga acelerada con el fin de que la estabilidad del terreno no se vea afectada durante el proceso de construcción del túnel.

## **II.8 ENSAYOS AL MICROCONCRETO**

### **II.8.1. Compresión Uniaxial**

La resistencia es la característica mecánica más importante del concreto, pues sirve para juzgar su calidad y para determinarla se emplea el promedio de los resultados de ensayos validos, sobre un conjunto de probetas normalizadas, en una fecha determinada y siguiendo un procedimiento establecido. (Porrero, Ramos Velazco, & Garces, 2009).

. El esfuerzo máximo de compresión es definido como el esfuerzo necesario para producir la fractura del testigo cilíndrico. Se considera que la fractura ocurre cuando se produce una caída repentina en la aplicación de la carga, no siendo capaz el testigo de soportar incrementos de carga posteriores .Para poder relacionar los ensayos es necesario uniformizar los resultados empleando testigos con una relación longitud/diámetro ( $l/d$ ) constante. Saint Venant estableció que en ensayos de testigos cilíndricos se produce una distribución de esfuerzos anómalos en una zona de longitud igual al diámetro del testigo medida a partir del área de aplicación o contacto de la carga por lo que recomendó el uso de testigos con relaciones  $l/d$  mayores o iguales a 2.

El método de ensayo está normalizado según la Norma COVENIN 338-2002. La Norma establece que la resistencia del concreto se determina al conocer el promedio de los resultados validos sobre un conjunto de probetas normalizadas, las cuales serán de forma cilíndrica.

Se debe trabajar siempre con un conjunto mínimo de probetas para contar con una confiabilidad estadística, el número mínimo acostumbrado suele ser tres por cada edad y condición de ensayo. El número de muestras es variable dependiendo del grado de probabilidad esperado, de la importancia de la obra y

de la precisión con la que ha venido trabajando. (Porrero, Ramos Velazco, & Garces, 2009).

Otro factor importante a analizar en este ensayo, es la velocidad con la cual el concreto adquiere esta resistencia. La edad normativa en la cual se evalúa la compresión es a los 28 días, sin embargo se pueden ensayar a otras edades para fines informativos (1, 3, 7, 14, 90 y 360 días).

Rotura de las probetas normativas

Según, (Porrero, Ramos Velazco, & Garces, 2009), la rotura de la masa de concreto al ser sometida a la compresión presenta patrones semejantes para cualquier tipo de sollicitación, las cuales permiten identificar las siguientes situaciones:

Rotura por agregados. Los granos gruesos se observan claramente partidos. Esta situación demuestra el uso de los agregados indebidos la calidad dudosa de la pasta.

Rotura por separación de interface mortero/agrado. La fractura se muestra en planos de desprendimiento de granos grueso, con la huella sobre la masa de mortero. Esta situación infiere suciedad en los agregados, la cual podría haber impedido la adherencia entre la pasta y los granos, calidad regular de la pasta o en el caso menos probable, excesiva absorción de la piedra, resecaándose las zonas de contacto con el mortero.

Rotura por pasta. Se producen desprendimientos del mortero en fragmentos, se podría suponer en este caso, una pasta poco cohesiva, baja dosis de cemento, arenas sucias o calidad de agregados muy superior a la calidad de la pasta. (Porrero, Ramos Velazco, & Garces, 2009)

Hemos observado que las diversas modalidades de ejecución del ensayo de compresión uniaxial en el pasado, tenían como propósito disminuir en mayor parte posible del efecto de la fricción, por medio de la interposición, como se ha dicho, entre el acero y el microconcreto, de teflón, goma, plomo, entre otros, y también por medio de un material lubricante como el grafito.

A parte de la fricción entre la base y el microconcreto, existen otras causas que contribuyen a la no obtención de un estado de sollicitación uniforme en el interior de la muestra, las cuales pueden modificar las propiedades mecánicas del microconcreto; estas se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) Rugosidad de la superficie de contacto entre la prensa y el microconcreto.
- b) Imperfección del paralelismo y perpendicularidad entre las caras.

La presencia de la rugosidad entre el microconcreto y la prensa determina la localización de concentraciones de sollicitaciones y de aquí también la posibilidad del inicio del fracturamiento justamente en la zona de contacto. La forma y distancia relativa de la rugosidad siempre es más importante que la altura de la muestra.

### **II.8.2. Compresión Cíclica**

Un fenómeno lineal de cierto interés (histéresis) es aquel que se verifica para un gran número de especímenes cuando la muestra es sometida a una compresión monoaxial variable de manera cíclica; esto es ilustrado en la figura 7a, donde se supone que  $\sigma_1$ , correspondiente al punto B, siendo reducida de repente a cero; la curva  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  durante esta fase, es indicada por el tramo de curva BC, siendo distinta del tramo OB, que se obtiene nuevamente por el aumento de  $\sigma_1$ ; para  $\sigma_1 = 0$ , la muestra tiene ahora una deformación residual OC (una parte de esta deformación puede todavía ser recuperada en el tiempo, mientras en el caso más general, permanece siempre una deformación remanente OD).

Si el esfuerzo  $\sigma_1$  en C es nuevamente aumentado, la curva que se obtiene es del tipo CE; esta intercepta la curva BC y sucesivamente alcanza la curva original en el punto E, y continua la trayectoria original al aumentar  $\sigma_1$ .

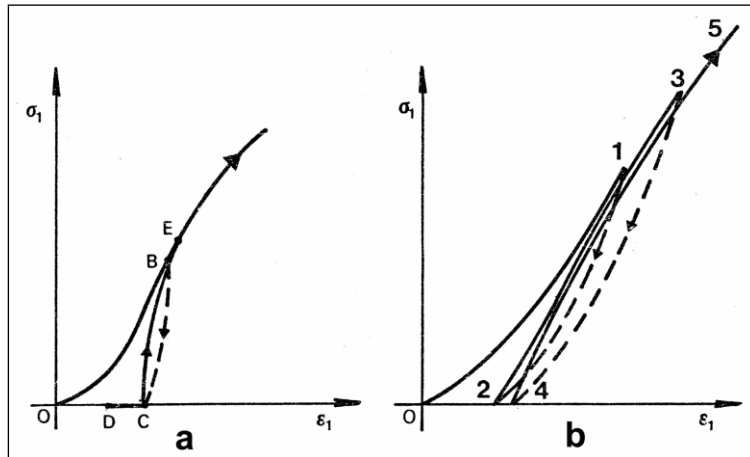


Figura 7 Curva Tensión-Deformación para especímenes sometidos a compresión monoaxial cíclica. (Suministrada por el Prof. Miguel Castillejo)

En la figura 7b hemos ilustrado este fenómeno en la hipótesis de repetir, uno después del otro, dos ciclos de carga. Todos estos fenómenos son debidos a la presencia de las microfisuras en la roca que, por efecto de la tensión aplicada de manera gradual; al disminuir este esfuerzo, a causa de la fricción entre las caras de las microfisuras, la deformación inducida no es restituida instantáneamente.

### II.8.3. Compresión diametral de discos. Ensayo brasilero

Este ensayo tiene por finalidad determinar el esfuerzo de tracción de un microconcreto a través de la aplicación de una carga lineal de compresión sobre un diámetro del disco del microconcreto a ensayar. El esfuerzo de tracción debería ser obtenido de un ensayo de tracción uniaxial directa, pero este ensayo es difícil y caro de ser realizado repetidamente.

Si la carga diametralmente aplicada  $P$  es aumentada, se verifica a lo largo del diámetro de carga del anillo, una falla aparentemente debida a la tracción: siendo este el método más empleado para la determinación de la resistencia a tracción del microconcreto, ya que los demás métodos son muy difíciles de realizar debido a los numerosos inconvenientes que se presentan en su realización.

En este ensayo, el disco de microconcreto es sometido a una carga lineal de compresión actuando sobre un diámetro. El resultado de este esfuerzo de compresión es una tensión horizontal y un esfuerzo de compresión vertical

variable. Cerca de los bordes de contacto, los esfuerzos compresivos toman valores máximos, lo que puede causar un fracturamiento local. Esta anomalía se reduce empleando testigos con relación espesor/diámetro de 0.5 y colocando un apoyo adicional entre el microconcreto y los bloques de la máquina en los puntos de carga. La fractura inicial producida sobre el testigo será el resultado del esfuerzo de tracción que ocurre en el centro del disco. Esta fractura es inducida, por lo que el resultado del esfuerzo a la tracción obtenida a partir de este ensayo será algo mayor del que se obtiene de un ensayo de tracción directa en donde el testigo tiene más opción a fallar por la zona de menor resistencia.



Figura 8 Esquema de ensayo brasileño. (Elaboración propia)

Con este ensayo se obtienen valores menores que con los otros y las dispersiones son mayores, pero es de gran sencillez de ejecución. Está descrito en la Norma COVENIN 341, “Método de ensayo para determinar la resistencia a tracción indirecta del concreto, usando probetas cilíndricas”.

#### **Consideraciones a tomar:**

- El microconcreto tiene que estar endurecido y curado con las condiciones normalizadas de laboratorio y romper las probetas a los 28 días, o al tiempo y circunstancias que se determinen en cada caso.
- Si se trata de testigos, se tratarán de acuerdo con los condicionantes y prescripciones de la norma genérica que los trata.
- Antes de colocar la probeta en la máquina de ensayo se dibuja, en cada cara, una línea que marque un diámetro del mismo plano axial.
- Se trazan las generatrices que unen los extremos correspondientes a los

diámetros marcados.

- Estas generatrices corresponden al plano de rotura.
- Se mide la probeta en todas sus direcciones con precisión de 1 mm.
- Se elimina el posible exceso de humedad de la superficie y se coloca la probeta en el dispositivo de ensayo.
- Se sitúa el dispositivo centrado en los platos de prensa, se aproximan los platos para poder fijar la posición del conjunto, sin aplicación de carga. A continuación, con un incremento de velocidad constante de entre  $0.5 \pm 0.2$  kg/cm<sup>2</sup>, se procede a la rotura de la probeta, anotándose la carga total u obtenida.
- Una vez rota la probeta, se observa el aspecto del hormigón y se anota cualquier anomalía que se detecte.

### Precauciones

- Si las probetas provienen de un curado en sala húmeda, hay que procurar que no se sequen.
- Cuando la forma o dimensiones de la probeta no cumplan con las tolerancias establecidas por la norma específica, se retirarán o se procederá a rectificarlas mediante pulido, si se trata de una desigualdad superficial, o se cortarán si la desviación es angular.

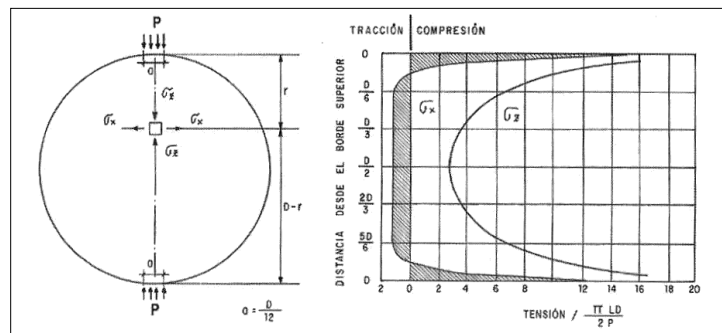


Figura 9 Distribución teórica de esfuerzos en el ensayo de tracción indirecta. (Porrero, Ramos Velazco, & Garces, 2009)



El cálculo para la tracción indirecta se realiza con la formula:

$$\sigma_{br} = \frac{2P}{\pi * L * d} \quad (2.20)$$

Donde:

$\sigma_{br}$ = esfuerzo de tracción, en kg/cm<sup>2</sup>

$P$ = carga máxima aplicada, por la maquina de ensayo en kg.

$L$ = longitud, en cm.

$d$ = Diametro, en cm.

#### **II.8.4. Ensayo de Corte Directo**

El ensayo de corte directo tiene como finalidad encontrar el valor del ángulo de fricción residual ( $\phi_r$ ) en testigos de un material, este ensayo se puede aplicar cuando existan planos de falla y discontinuidades naturales o artificiales en las muestras a estudiar. La determinación del esfuerzo cortante de un testigo de microconcreto es importante en el diseño de estructuras de túneles y otros.

Es necesario distinguir dos conceptos: ángulo de fricción interna y ángulo de fricción residual. El ángulo de fricción interna actúa mientras el material de microconcreto no ha fallado mientras que el ángulo de fricción residual actúa cuando se ha producido la falla. En muchas estructuras de concreto se puede observar que el material se encuentra fracturado; sin embargo, no se aprecia problemas de sostenimiento, debido a que no se ha producido movimiento relativo entre las partes falladas y esto se debe principalmente a la fricción residual, lo cual indica que contiene una discontinuidad. Esta discontinuidad esta todavía cementada, es decir habría que aplicar una fuerza de tensión para que las dos mitades del material, una a cada lado de la discontinuidad, se separen. La discontinuidad es absolutamente planar, no tiene ondulaciones ni rugosidades y la sometemos a un esfuerzo normal ( $\sigma$ ), aplicado carga perpendicularmente a su superficie y a un esfuerzo cortante ( $\tau$ ) suficiente para causar un desplazamiento ( $\delta$ ). Entonces obtendremos el gráfico esfuerzo cortante vs. Desplazamiento

cortante para un esfuerzo normal constante. Para pequeños desplazamientos, el testigo se comporta elásticamente y el esfuerzo cortante se incrementa linealmente con el desplazamiento.

A medida que las fuerzas que resisten al movimiento van cediendo, la curva se vuelve no lineal y entonces el esfuerzo cortante alcanza un pico que es el valor máximo. Después de esto el esfuerzo cortante requerido para causar desplazamiento cortante cae rápidamente y entonces el valor de esfuerzo cortante se mantiene constante. A este valor constante llamamos esfuerzo cortante residual.

Para un gráfico esfuerzos cortantes máximos vs. Esfuerzos normales aplicados la curva es aproximadamente lineal, tiene una pendiente igual al ángulo de fricción máximo e intercepta al eje de esfuerzos cortantes en  $C_{max}$ , fuerza de cohesión del material cementante. Este componente de cohesión del esfuerzo cortante es independiente del esfuerzo normal pero el componente fraccional aumenta con el incremento de esfuerzo normal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\tau = C_{max} + \sigma \tan \phi_{max} \quad (2.21)$$

Si graficamos el esfuerzo cortante residual contra el esfuerzo normal constante para cada ensayo obtenemos la ecuación:

$$\tau = \sigma \tan \phi_r \quad (2.22)$$

La ecuación nos indica que el material cementante se ha perdido ( $C_r=0$ ).

### **II.8.5. Ensayo De Fatiga**

La fatiga consiste en el fallo de un elemento estructural por la acción de una carga repetida de valor inferior a la carga teórica de colapso de esa pieza. Esta definición habitual del término de la fatiga pone de relieve cómo un material puede alcanzar la rotura estando sometido a una acción menor a la cual resiste de forma estática, si ésta se aplica de forma repetida.

La fatiga es un proceso de progresivo daño interno del material que produce el crecimiento de fisuras sub-críticas. En todos los elementos estructurales existe

algún defecto, por muy pequeño que sea, que puede ser debido a algún accidente, a la fase constructiva u otro cualquiera. Estos defectos o fisuras tienen una influencia despreciable en el cálculo estructural, y están muy lejos del conocido como defecto crítico, que es el que produce la rotura. Es por ello que a estos defectos se les llama fisuras sub-críticas. Sin embargo, el proceso de cargas repetidas produce el crecimiento de estas fisuras, de manera que se puede alcanzar la rotura tras un número elevado de ciclos de carga.

La Figura 10 representa un elemento estructural que está sometido a una fuerza cíclica que oscila entre los valores  $F_{\max}$  y  $F_{\min}$ , siendo  $F_{\max}$  menor que la fuerza teórica de rotura,  $F_u$ . En esta estructura existe una fisura de profundidad inicial  $a_0$ . A medida que aumenta el número de ciclos de carga, la fisura crece  $a = a_0 + \Delta a$  hasta que la profundidad alcanza el valor de la fisura crítica,  $a_c$  con lo que se produce la rotura inducida por fatiga.

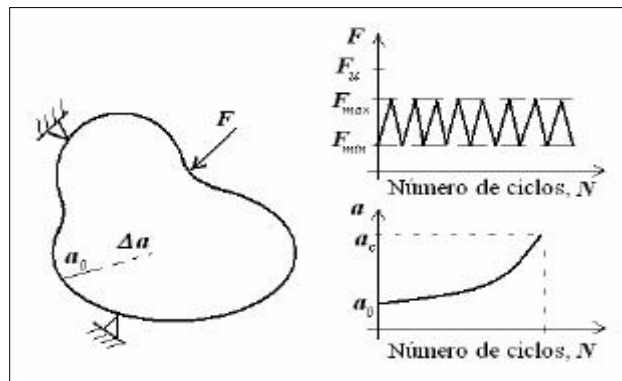


Figura 10 Esquema de un cuerpo sometido a una carga cíclica.

### II.8.5.1. Clasificación de los ensayos de fatiga

En general los ensayos de fatiga se clasifican por el espectro de carga- tiempo, pudiendo presentarse como:

#### Ensayos de fatiga de amplitud constante.

Los ensayos de amplitud constante evalúan el comportamiento a la fatiga mediante ciclos predeterminados de carga o deformación, generalmente senoidales o triangulares, de amplitud y frecuencia constantes.

### Ensayo de fatiga de amplitud variable.

En fatiga, cuando la amplitud del ciclo es variable, se evalúa el efecto del daño acumulado debido a la variación de la amplitud del esfuerzo en el tiempo.

#### **II.8.5.2. La fatiga depende fundamentalmente de las siguientes variables**

La oscilación de tensiones, comprobándose a través de las curvas S-N que el número de ciclos resistentes hasta rotura disminuye drásticamente cuando esta oscilación de tensiones aumenta.

En elementos de comportamiento no lineal como el hormigón, influye además el nivel máximo de la tensión, difiriendo de la respuesta clásica de los metales expuesta hasta ahora, ya que ante igual amplitud de tensiones, es más desfavorable que los límites de oscilación sean mayores.

La geometría de la pieza, en la cual se engloban las características del defecto inicial que crece a medida que aumenta el número de ciclos de carga.

El comportamiento del material, ya que es distinta la acumulación del daño en un material como el acero, en el que buena parte de su respuesta se encuentra en el rango elástico y lineal, que un material fuertemente no lineal como el hormigón.

El fallo por fatiga de los materiales que cumplen los requisitos de MFEL (metales) es frágil, con la dificultad de aviso previa que ello conlleva.

#### **II.8.5.3. El proceso de fatiga del concreto**

Cuando las estructuras trabajan sometidas a la acción de cargas cíclicas, se provoca paulatinamente un deterioro en el concreto, según el cual después de cada ciclo de carga-descarga, se acumula una deformación adicional permanente; de modo que al cabo de un determinado número de ciclos, que depende del intervalo de fluctuación de los esfuerzos aplicados, se llega al estado de deformación crítico en el que sobreviene la falla del concreto. Este tipo de falla, que depende del tiempo requerido para acumular el número de ciclos (de acuerdo con la frecuencia de estos), se denomina falla por fatiga dinámica o simplemente falla por fatiga.

El número de ciclos de carga-descarga que puede resistir el concreto depende del nivel del esfuerzo máximo aplicado. Conforme disminuye este nivel se incrementa el número de ciclos que el concreto puede soportar. El número de ciclos de carga-descarga que puede resistir el concreto depende del nivel del esfuerzo máximo aplicado. Conforme disminuye este nivel se incrementa el número de ciclos que el concreto puede soportar.

El fallo por fatiga del concreto es menos frágil que el que sucede bajo la actuación de una carga monótona, y completamente diferente al de la fatiga de los metales. Es muy importante durante el proceso el crecimiento de la deformación total y remanente.

Existe una fase final en la vida del hormigón a fatiga en la que el crecimiento de la deformación aumenta muy rápidamente hasta producirse el fallo.

## **II.9 MÉTODO LOCATI**

LOCATI es un método de ensayo por fatiga acelerada que pretende determinar el límite de fatiga a partir de una única probeta, mediante el análisis de la deformación de la probeta (Carrascal, Casado, Diego, & Polanco), consiste en aplicar una fuerza máxima escalonada y creciente durante un número constante de ciclos a una frecuencia determinada. En cada número de escalones de ciclos los niveles de esfuerzo constantes se irá incrementando paulatinamente al ir superando cada uno de los escalones. A medida que se aumenta la carga, llegará un momento en el que se alcanza el fallo por fatiga. Este nivel de esfuerzo, no coincide con el límite de fatiga del material, por lo cual la dificultad del método radica en la búsqueda de la correlación entre dicho parámetro y los resultados aportados por el ensayo. Sin embargo mediante un análisis del comportamiento de la deformación se puede estimar el límite a la fatiga del material.

Los métodos tradicionales de caracterización en fatiga exigen la realización de un gran número de pruebas que alargan en el tiempo la obtención de resultados, así como el empleo de un elevado número de probetas. La utilización de métodos de caracterización acelerada permite reducir los tiempos de ensayo y el número de

probetas empleadas.

## **II.10 ONDAS DE ULTRASONIDO**

Este ensayo consiste en medir el tiempo que tarda un impulso ultrasónico en atravesar la masa del concreto que se está investigando. En cierto modo se está midiendo el módulo de elasticidad dinámico del concreto el cual, parcialmente, se relaciona con la resistencia mecánica del material.

La técnica más común y confiable es la medición directa que consiste en colocar el emisor y el receptor enfrentados en dos caras opuestas del elemento a estudiar. Ambos terminales deben establecer un buen contacto con la superficie del concreto, evitando vacíos intermedios donde resulta muy baja la Velocidad de propagación. Para lograr ese buen contacto se les unta a los terminales una capa de grasa especial. Ambos terminales están conectados a un aparato que, por interferencia electrónica, indica el tiempo de tránsito del pulso ultrasónico ( $t$ ) entre la salida y la llegada de la onda. Conocida la distancia ( $L$ ) entre ambos puntos de medición, se obtiene la velocidad característica ( $L/t$ ) del concreto en esa zona, expresada en Km/s, o en m/s. A mayor velocidad, mayor módulo de elasticidad y mayor resistencia.

Para que los resultados del ensayo de la velocidad del pulso ultrasónico sean confiables, se deben cuidar los siguientes aspectos:

El aparato de ensayo debe estar estrictamente calibrado y usarse en la correspondiente escala de apreciación. El equipo se suministra con una barra que hace las veces de patrón de referencia.

Los terminales deben estar en perfecta oposición. Para lograr eso es bueno mantener fijo un terminal y mover ligeramente el opuesto, hasta determinar la lectura mínima. La medición de la distancia entre terminales ( $L$ ) debe realizarse con precisión al milímetro.

Se debe tener alguna idea del estado de humedad del concreto, ya que ella favorece la velocidad de transmisión.

Los valores de velocidad de pulso ultrasónico no deben convertirse directamente

en la resistencia mecánica del concreto. Sin embargo, estudios detallados de correlación entre resultados de ultrasonido y resultados de probetas normativas o núcleos, representativos del mismo concreto que se está evaluando, pueden autorizar el uso de esas velocidades para estimar la calidad del concreto en otras partes de la misma obra.

## **CAPITULO III**

### **MÉTODO**

El siguiente capítulo, describe los procedimientos empleados para la evaluación del comportamiento del microconcreto en las condiciones reales de trabajo en inyecciones de túneles de líneas de transporte subterráneo. La descripción de estos procedimientos tiene como finalidad desarrollar el área de investigación a la cual va dirigida este Trabajo Especial de Grado e igualmente persigue validar e incorporar a las referencias actuales valores provenientes de estos ensayos.

#### **III.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES**

Para la elaboración de la mezcla de concreto fue importante conocer la procedencia y características de los materiales a utilizar, puesto que los resultados que se iban a generar dependían, en gran medida de sus propiedades.

#### **III.2 DESCRIPCION DE MATERIALES EMPLEADOS**

##### **III.2.1 Agregado fino**

El agregado fino que se uso para elaborar la mezcla fue una composición de arena natural de río y arrocillo.

Para hacer los ensayos, se utilizó un metro y medio (1 ½) cúbico de arena y dos sacos de arrocillo.

##### **III.2.2 Cemento**

El cemento usado fue el Pórtland Tipo I. Al igual que la arena y arrocillo fueron donados por el IMME<sup>2</sup>. La cantidad de sacos adquiridos fue de dos; tal cantidad, se obtuvo a través del diseño de mezclas, el cual es necesario hacer previamente para determinar cuánto se requiere de cada material.

Al cemento adquirido, no fue necesario hacerle ningún tipo de ensayo para verificar su calidad; simplemente se tuvo cuidado que los sacos estuviesen bien cerrados, que fuesen de la misma marca comercial (LAFARGE-cementos La vega)

---

<sup>2</sup> Instituto de Materiales y Modelos Estructurales.



y lo más importante, con fecha de fabricación reciente.

### **III.2.3 Agua**

El agua usada es potable y fue suministrada por HIDROCAPITAL a través de su red de distribución. Es importante no usar como agua de mezclado, aquella cuya procedencia sea dudosa; ya que podría estar contaminada y ello afectaría a la resistencia del microconcreto. Si el agua no es potable, se deben realizar los ensayos necesarios antes de usarla, tanto físicos como químicos para determinar su composición. En todo caso, para evitar estos inconvenientes lo más prudente es usar el agua potable.

### **III.2.4 Cemento Dental**

El cemento dental se usó para las probetas que fueron sometidas al ensayo de corte. El uso de este producto, se debe a las ventajas que ofrece gracias a su rápido fraguado y a las grandes resistencias que alcanza en minutos.

Las características de este producto fueron suministradas por la casa comercial que expende este material y las cuales se describen a continuación:

Tiempo de fraguado: 10min

Expansión al fraguado: 0,14%

Fuerza compresiva MPA después de una hora: 27 PSI

## **III.3 ENSAYOS REALIZADOS A LOS MATERIALES**

Todos los ensayos realizados en este Trabajo Especial de Grado se basaron en las Normas COVENIN, aunque es conveniente indicar que se consultaron algunas normas de la ASTM<sup>3</sup> y de la A.C.I.<sup>4</sup> para comparar la similitud del proceso que se describe en cada una de ellas con las Normas Venezolanas. Solo se hicieron ensayos al agregado fino, y a las mezclas elaboradas; el cemento y al agua no requirieron ensayos normalizados.

Tabla 6 Normas COVENIN para el análisis. (Elaboración propia)

---

<sup>3</sup> American Society for Testing and Materials.

<sup>4</sup> American Concrete Institute

PROPOSITO	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO COVENIN
Análisis del agregado	Método de ensayo para determinar la composición granulométrica de agregados finos y gruesos	255-1998
	Método de ensayo para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino	268-1998
	Agregados. Extracción de muestras para morteros y concretos	270-1998
	Agregados para concreto. especificaciones	277-2000
Análisis para mezclas de concreto	Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto	338-2002
	Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams	339-2003
	Método para mezclado de concreto en el laboratorio	354-2001

### **III. 4 DISEÑO DE MEZCLA PARA MICROCONCRETO**

El diseño de mezcla se realizó para determinar las cantidades de los componentes del microconcreto. Para hacer el diseño de mezcla, es necesario analizar previamente el agregado que va a ser usado. Esto significa, que al agregado se le deben determinar la mayor cantidad de características posibles para proceder a realizar las mezclas. Como se dijo anteriormente, al cemento y al agua no se le realizaron análisis de ningún tipo.

#### **III.4.1 Análisis del agregado**

Al agregado se realizaron una serie de análisis para determinar sus características principales. Estas características son: la granulometría, y el peso específico.

##### **III.4.1.1 Granulometría de los agregados**

La granulometría y el tamaño máximo de los agregados son importantes debido a su efecto en la dosificación, trabajabilidad, economía, porosidad y contracción del concreto. El análisis granulométrico, de los agregados, se realizó según lo contemplado en la norma COVENIN 255-1998 "Agregados. Determinación de la composición granulométrica".

##### Agregado fino

Según lo estipulado en la norma, una vez pesada la muestra de arena húmeda, se procedió a secarla en una hornilla por 24 horas para que alcanzara una masa constante y así obtener el porcentaje de humedad de la misma con un resultado más preciso. Luego se pesó este nuevo valor de arena, para determinar la diferencia de peso entre la inicial y la final. Se ensamblaron los tamices en orden de tamaños de aberturas decrecientes desde arriba hacia abajo: 3/8", 1/4", #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200, colocando la muestra en el tamiz superior. Se agitaron los tamices con ambas manos hacia los lados. Se determinó la masa de cada porción de la muestra en los tamices, verificando que la masa total del material después del tamizado coincidiera con la masa original de la muestra colocada inicialmente en el tamiz superior. Se calculó, para el agregado, el porcentaje del material que pasó por cada tamiz.



Figura 11 Proceso de tamizado para elaboración de la granulometría  
(Elaboración Propia)

### III.4.1.2 Determinación del peso específico y porcentaje de absorción

El peso específico y la absorción se analizaron según los pasos indicados en la Norma COVENIN 268 dando como resultado los valores expuestos en la Tabla 29: Peso específico y porcentaje de absorción de agregado fino (arena). Elaboración propia

Dichos valores se obtuvieron a través de los ensayos hechos en el laboratorio.

### III.4.2 Determinación general de la dosificación para mezclas de microconcreto

A continuación, se describe paso a paso el cálculo de la dosificación de la mezcla. Cabe destacar que se realizó una única mezcla. A la mezcla se le asignó para el diseño, una cantidad de cemento, dosis, C y la relación agua-cemento las cuales fueron tomadas de acuerdo a resistencia deseada con el procedimiento expuesto en el capítulo I.

Tabla 7 Dosificación de la mezcla. (Elaboración propia)

Mezcla	Cantidad de cemento	Relación agua-cemento
	C	$\alpha$
M	47,9	0.35

#### III.4.2.1 Condición del agregado saturado con superficie seca, $A_{ss}$

El agregado se debe calcular en la condición ideal de saturado con superficie seca, para que no absorba, ni añada agua a la mezcla durante la preparación.

El proceso consiste en:

Determinar:

- A Número de sacos, C
- B Cantidad de agua por  $m^3$  por medio de la relación agua/cemento
- C Cantidad de agregado a través de la Ecuación Volumétrica
- D Conversión de la dosificación para el volumen de cálculo requerido sin corregir por humedad.

### **III.4.2.2 Humedad**

Para el cálculo de la humedad del agregado fino se realizaron los siguientes pasos:

- Se pesó 500 gr. de agregado fino.
- Se colocó al horno a 110° C por 24 horas.
- Al término de las 24 horas se retiró la muestra del horno y se volvió a pesar.
- La diferencia de peso entre el material húmedo y el mismo secado al horno brinda el valor correspondiente a la humedad.

### **III.4.2.3 Corrección de la cantidad de agua**

Al término de la corrección del agregado, se continúa con el ajuste de la cantidad de agua a través de la Ecuación (2.5)

### **III.4.3 Medición del asentamiento con el Cono de Abrams**

La medición del asentamiento final se realizó tomando en consideración la (COVENIN 339.). El cono de Abrams está construido de acero, con un espesor aproximado de 1.5 mm. Su parte interior tiene forma de un tronco de cono, con dimensiones de 20 cm de diámetro de base mayor, 10 cm de diámetro de base menor y 30 cm de altura. Las bases son abiertas y paralelas entre sí, perpendiculares al eje del cono. Está provisto de asas y aletas.

El molde se colocó sobre una superficie horizontal rígida, plana y no absorbente (una lámina metálica). El molde se sujetó firmemente por las aletas con los pies y se llenó con la muestra de concreto, vaciando ésta en tres capas, cada una de ellas de un tercio del volumen del molde.

Cada capa se compactó con 25 golpes de la barra compactadora de acero, recta, cilíndrica y lisa, de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud, con el extremo semiesférico, distribuidos uniformemente en toda la sección transversal acercándose progresivamente en espiral desde los bordes hacia el centro de la sección. El molde se llenó por exceso antes de compactar la última capa. Luego

se enrasó con la barra compactadora.

Inmediatamente se retiró el molde, alzándolo cuidadosamente en dirección vertical. El asentamiento se midió luego de alzar el molde y se obtuvo por la diferencia entre la altura del molde y la altura promedio de la base superior del cono deformado.



Figura 12 Proceso de medición del Asentamiento. (Elaboración propia)

### **III.5 ELABORACIÓN, CURADO Y ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO**

Las probetas de concreto se realizaron según lo contemplado en la Norma COVENIN 338-1994 “Método de elaboración, Curado y Ensayo a Compresión de Cilindros de Concreto”.

Una vez conocida las dosis y cantidades de los componentes de la mezcla para la resistencia requerida, se llevó a cabo el proceso de mezcla para concreto, estipulado en la Norma COVENIN 354 “Método de Mezclado de Concreto en el Laboratorio”. Para este caso se empleó una mezcladora de eje de inclinación variable usualmente llamado “trompo”. La inclinación es ajustable por medio de un timón el cual permite la carga y descarga. Capacidad de 180 litros con motor eléctrico. En el Trabajo Especial de Grado se elaboro una mezcla de diseño con resistencia a compresión de 350 kg/cm<sup>2</sup> para los 28 días.



Figura 13 Proceso de elaboración de la mezcla. (Elaboración propia)

### III.5.1 Elaboración de probetas cilíndricas

Los moldes utilizados fueron limpiados para eliminar restos adheridos de mezclas anteriores, su superficie interior y su base fueron untadas con aceite para evitar la adherencia, una vez fraguada la mezcla. El concreto se vació en los moldes, en tres capas de igual volumen; cada capa se compactó de forma manual, utilizando una barra de acero, recta, cilíndrica y lisa, de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud, con el extremo semiesférico, implementando 25 golpes por cada capa de mezcla agregada. Los golpes se distribuyeron uniformemente en toda la sección transversal del molde.

Se golpearon suavemente las paredes del molde y se enrasó la probeta con la barra compactadora, de manera que la superficie quedó perfectamente lisa y al ras con el borde del molde





Figura 14 Elaboración de probetas. (Elaboración propia)

Luego las 3 probetas se sumergen en un tanque de agua saturada de cal para su curado, este procedimiento es de gran importancia porque no deja que se pierda la resistencia mecánica, se gana impermeabilidad, se aumenta la resistencia al desgaste y la abrasión y se logra mayor durabilidad. Luego se trasladan al laboratorio para realizarles el ensayo a compresión a los 7,14 y 28 días de ser desencofradas.

El curado de los cilindros se realizó según lo estipulado en la Norma COVENIN 338-1994 “Método de elaboración, Curado y Ensayo a Compresión de Cilindros de

Concreto”.

### III.5.2 Elaboración de viguetas rectangulares

Siguiendo las indicaciones de la Norma COVENIN 345-80 se realizaron las viguetas y las extracciones de los núcleos.

Con la ayuda de un cucharón se vació la mezcla en los moldes; posteriormente hubo que distribuir el concreto usando la varilla de compactación. La compactación se realizó mediante el varillado y vibrado. Después de la compactación, la superficie se terminó con un rasero de metal, con un mínimo de pasadas, para producir una superficie plana y uniforme que estuviese a nivel de las orillas del molde y que no presentaran depresiones o abultamientos de más de 3 mm.



Figura 15 Elaboración de viguetas rectangulares. (Elaboración propia)

### III.5.3 Método para extracción de núcleos a partir de viguetas

Los núcleos fueron extraídos luego de haber transcurrido un tiempo prudencial de fraguado para evitar la perturbación de las muestras. Utilizando una perforadora tubular con broca de punta de diamante (diámetro 2¼ de pulg) ubicándola de tal forma que su eje coincidiera con la dirección de colocación del microconcreto.

Durante la extracción de los núcleos se mantuvo una constante hidratación mediante una manguera ajustada en la parte superior de la perforadora, evitando la perturbación de las muestras y el excesivo calentamiento de la broca.



Figura 16 Desencofrado de viguetas y extracción de núcleos. (Elaboración propia)

Luego de completar el proceso de extracción de los núcleos los mismos fueron cortados con una tronadora de concreto, ya que cada ensayo los especímenes debían tener la altura adecuada. Todos los especímenes una vez cortados fueron refrentadas las caras de compresión para lograr paralelismo entre ellas obteniéndose una mejor uniformidad de la superficie obteniendo un acabado liso y uniforme sin grumos, ranuras y defectos visibles.

#### **III.5.4 Método del ensayo a compresión con prensa universal**

Este método se realizó siguiendo el procedimiento explicado en la Norma COVENIN 338 y se utilizó la Prensa Universal de 200 toneladas que se encuentra en el IMME. La finalidad es verificar y registrar los valores de resistencia a compresión de los cilindros. Se ensayaron tres cilindros por resistencia evaluada, a los 7, 14 y 28 días de la realización de las probetas.

Se determinó el diámetro y la altura de los cilindros, promediando tres medidas tomadas para cada uno de ellos, con la ayuda de un vernier. Los cilindros se colocaron en la Prensa Universal, donde se conto con la ayuda del personal técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales para la manipulación de la Prensa Universal. Finalmente se tomaron los datos de carga soportada, y con las dimensiones anteriores, se calculó la resistencia a compresión de las probetas.



Base de neopreno

Figura 17 Ensayo a compresión de cilindros normalizados. (Elaboración propia).

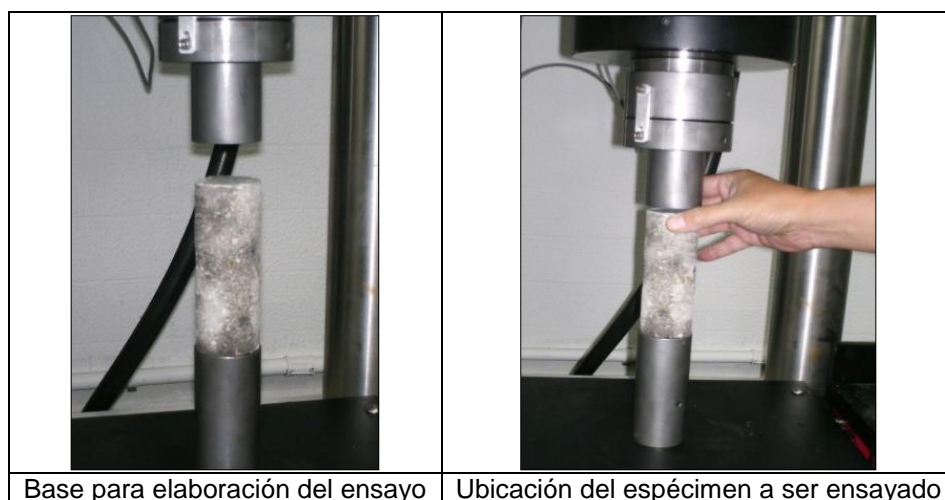
### III.5.5 Ensayo de compresión simple de núcleos de microconcreto

El ensayo a Compresión simple de los núcleos de microconcreto (especímenes) fue realizado siguiendo la metodología establecida en la Norma COVENIN 338, con la diferencia de que el ensayo fue elaborado mediante una programación donde se estableció que el actuador de carga debía detenerse una vez que la

muestra alcanzara una deformación axial menor al 2%. A demás el software del equipo permite introducir las especificaciones del espécimen (diámetro, altura, peso) con las cuales realiza un cálculo inmediato del área del espécimen, y de los esfuerzos desviadores y deformaciones axiales a medida que aumenta la carga y los desplazamientos.

Tabla 8 Información y Programación del programa para el análisis de Compresión simple.  
(Elaboración propia)

Software:	Gcts c.a.t.s. advanced
Version:	1,89
Project:	Tesis concret imme - 2011
Specimen:	Com_01
Description:	Compresion
Controller id:	1577 scon-2000
Fases: 1	
Duration:	
Timed:	30 min
Input limit:	
Input:	Ai-2: axial displacement
Check value:	5 (mm)
Data acquisition	
Timed increments:	5 (seconds)
Master input:	Ai-1: axial load
Sensitivity:	0,5 (kN)
Data saving	
Data buffer:	Continuous
Feedback	Ai-2: axial displacement
Rate:	1 (mm)/(minute(s))



Base para elaboración del ensayo

Ubicación del espécimen a ser ensayado

Figura 18 Ensayo de compresión simple. Colación del espécimen. (Elaboración propia)

### III.6 ENSAYO DE CORTE DIRECTO/ANILLO DE CORTE CATS

Este ensayo se elaboro mediante la utilización de una caja de corte convencional empleada para determinar la resistencia al corte pico y residual en función de los esfuerzos normales al plano de corte Para la ejecución del ensayo de corte directo se realizaron los siguientes pasos:

1. Se engraso la superficie interna de la caja de corte inferior, colocándola sobre una superficie plana y lisa.

2. Se posiciono el espécimen dentro del anillo inferior con ángulos de inclinación de 0, 30, 45, 60 y 90 grados para cada caso, empleando para ello dos pequeñas barras de aluminio que al unir con ligas permitieron fijar el espécimen en las posiciones deseadas. Se coloco una marca en el lado exterior de la caja de corte para saber cuál es la orientación del espécimen, luego de que el mismo esté cubierto con yeso dental completamente.

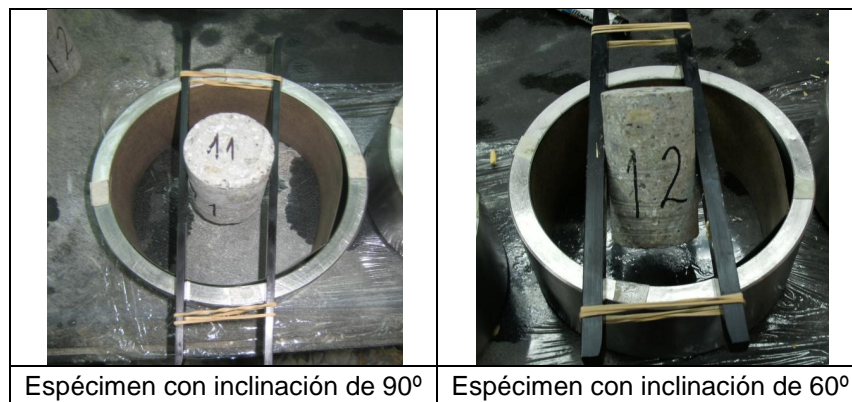


Figura 19 Ensayo de corte directo. Posicionamiento del espécimen. (Elaboración propia)

3. Se mezclo el cemento dental de acuerdo con las instrucciones indicadas por el fabricante, se vació la mezcla en la parte inferior del anillo de la caja de corte, dejando unos pocos milímetros desde el tope para luego rellenarlos con plastilina de escultura que sirve de interface entre el anillo superior y el anillo espaciador. Se respeto el curado de la mezcla confinante por un lapso de 10 minutos, hasta que esta se endureciera.

<p>Especificaciones del yeso dental utilizado</p>	<p>Preparación de mezcla confinante (yeso dental)</p>
<p>Espécimen con la mezcla de yeso dental esperando tiempo de endurecido</p>	<p>Espécimen con la interface de plastilina</p>

Figura 20 ensayo de corte directo. Preparación de mezcla y espécimen dentro de anillos de la caja de corte. (Elaboración propia)

4. Se realizo otra cantidad de mezcla de yeso dental y se vació encima de la capa de plastilina, llenando completamente el anillo superior del espécimen.

<p>Espécimen con el anillo superior antes de ser vaciado con cemento dental</p>	<p>Espécimen listo para ser ensayado</p>

Figura 21 ensayo de corte directo. Colocación del anillo superior y estado final de la muestra confinada. (Elaboración propia)

5. Una vez confinada la muestra se dejó alcanzar la resistencia de la mezcla por un lapso de 24 horas, para poder ser ejecutado el ensayo.

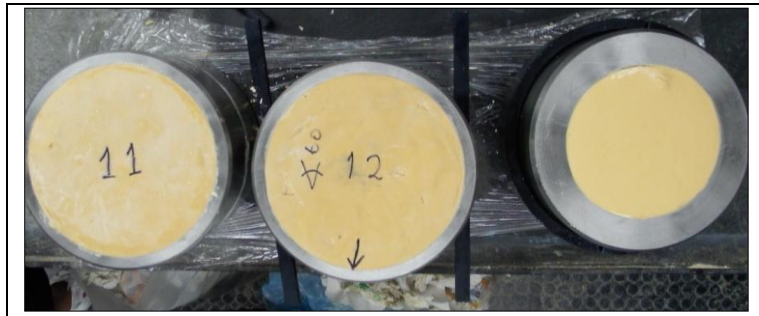


Figura 22 ensayo de corte directo. Muestras confinadas en espera de tiempo de fraguado.  
Elaboración propia.

6. Transcurridas las 24 horas se introdujeron las capsulas contenedoras de los especímenes dentro de la caja de corte asegurándose de que los anillos se encontraran completamente vertical, para permitir el fácil deslizamiento dentro de la caja de corte. En algunos casos fue necesario, golpear ligeramente con un martillo de goma para que el anillo del espécimen se insertara parcialmente dentro de la caja de corte.

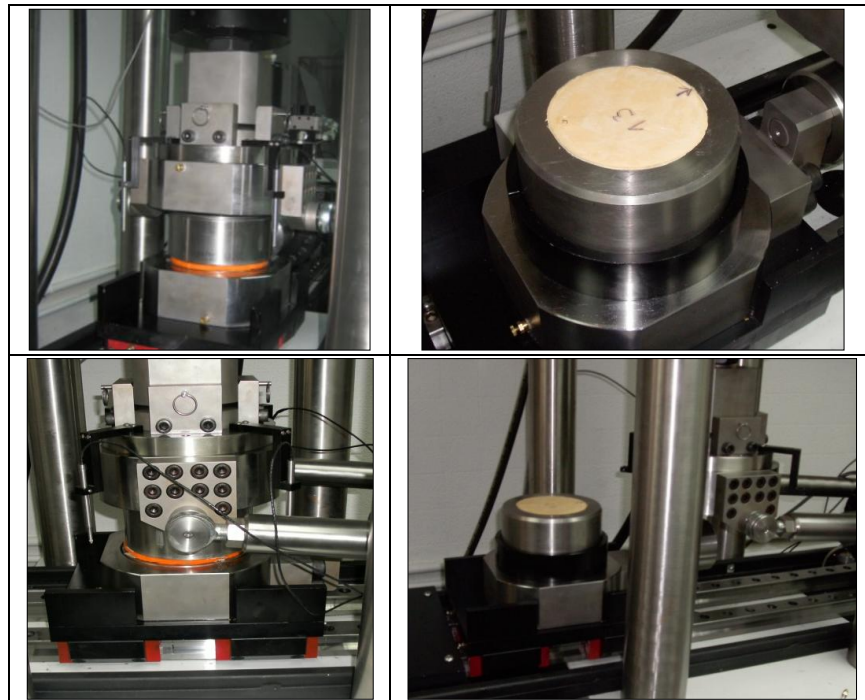


Figura 23 Ensayo de Corte Directo. Capsula confinante dentro de la caja de corte. Elaboración propia



El sistema utiliza mecanismos de aplicación de fuerza normal y también de carga horizontal (fuerza de corte). Las cargas normales y de corte se registraron empleando celdas de carga y por medio de anillos. Las deformaciones se obtuvieron empleando transductores de variación diferencial lineal/linear variable differential transducers (LVDTs).

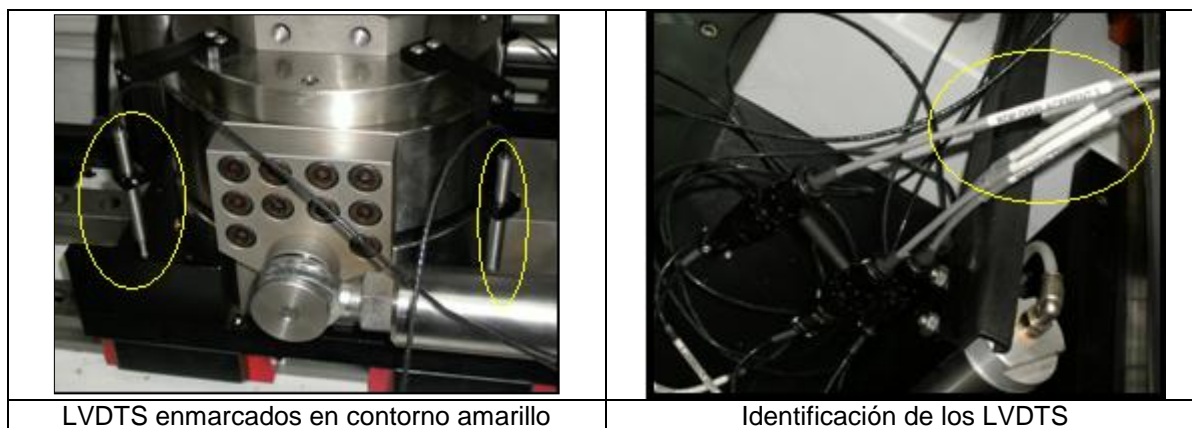


Figura 24 Ensayo de Corte Directo. Ubicación de traductores de variación diferencial lineal  
Elaboración propia.

Las cargas normales y de corte se aplicaron empleando actuadores servo-controlados. La operación servo-controlada permite determinar fácilmente la dilatación de la muestra.

Ensayo de Corte Directo GCTS dentro del programa CATS, es un programa que tiene previsto el control y determinación a tiempo real de entradas experimentales, tal como el área corregida de corte del espécimen, así como también el esfuerzo normal y el esfuerzo al corte.

Tabla 9 Ensayo de Corte Directo. Programación. Elaboración propia

Test:	Direct shear
Specimen:	11_1
Type:	Cylindrical
Shear surface area:	Circular
Phase 1	
Description:	Carga normal 20kn
Phase 2	
Description:	Carga normal 40kn
Phase 3	
Description:	Carga normal 80kn
Phase 4	
Description:	Carga normal 120kn

### III.7 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (BRASILERO)

Los especímenes utilizados en el ensayo fueron discos circulares cortados con una relación espesor/diámetro de 0.5 aproximadamente

El espécimen se oriento verticalmente siendo el eje de aplicación de la carga una línea trazada a lo largo del diámetro en cada espécimen.

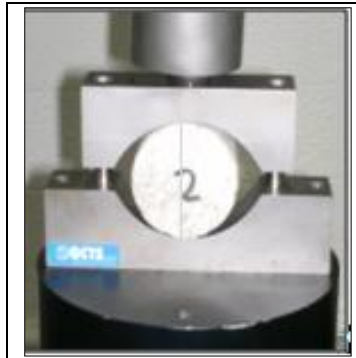


Figura 25 Ensayo Brasiler. Orientación del espécimen a ensayar. (Elaboración propia)

El espécimen fue instalado en la máquina de ensayos asegurando que la carga fuese aplicada sobre el diámetro trazado y que los apoyos adicionales coincidieran con la superficie de apoyo.

La carga normal fue aplicada con velocidad constante de manera que la falla se produjese entre 1 y 10 minutos luego de iniciado el ensayo

Tabla 10 Ensayo Brasiler. Programación. (Elaboración propia)

Specimen:	Bra-01
Description:	Ensayo basiler
Phases:	1
Duration:	
Timed:	10 (minute(s))
Input limit:	
Input:	Ai-2: axial displacement
Check type:	>=
Check value:	2 (mm)

### III.8 ENSAYO DE FATIGA ACELERADA (LOCATI)

Para el ensayo de fatiga acelerada mediante el método LOCATI los especímenes fueron ensayados a los 3, 7, 14 y 28 días de tiempo de curado se prepararon de igual forma que en todos los ensayos anteriores, siendo cortados, refrentadas sus caras, pesados, medidos e identificados. Los datos de sus dimensiones y peso se introdujeron en la configuración del ensayo, de esta forma el programa calculaba los esfuerzos desviadores y las deformaciones axiales.

La programación del ensayo conto con 22 fases de ejecución, donde cada fase de número impar correspondía a periodos de incrementos de carga con un tiempo estipulado de 30 segundos, para ser en total 11 rampas de incremento de cargas; las fases de números par correspondían a una onda de tipo triangular en la cual se establecieron 1000 ciclos de carga y descarga con frecuencia constante de 5Hz y de amplitud variable en cada fase, iniciando con una amplitud de 11 kN con incrementos en cada una de ellas de 3kN hasta cumplir las 22 fases o la ocurrencia de falla de la muestra.

Tabla 11 Programación del Ensayo de Fatiga acelerada por el método LOCATI.  
(Elaboración propia)

Fase	Tipo de onda	Carga axial (kN)				Amplitud (kN)	Toma de datos (s)	Duración (s)	Duración (ciclos)	Frecuencia (Hertz)
		Inicio	Final	Max	Min					
1	Rampa	2	17				0,05	30		
2	Triangular	17		28	6	11	0,01		1000	5
3	Rampa		20				0,05	30		
4	Triangular	20		34	6	14	0,01		1000	5
5	Rampa		23				0,05	30		
6	Triangular	23		40	6	17	0,01		1000	5
7	Rampa		26				0,05	30		
8	Triangular	26		46	6	20	0,01		1000	5
9	Rampa		29				0,05	30		
10	Triangular	29		52	6	23	0,01		1000	5
11	Rampa		32				0,05	30		
12	Triangular	32		58	6	26	0,01		1000	5
13	Rampa		35				0,05	30		
14	Triangular	35		64	6	29	0,01		1000	5
15	Rampa		38				0,05	30		

\*Continuación de la Tabla 11

Fase	Tipo de onda	Carga axial (kN)				Amplitud (kN)	Toma de datos (s)	Duración (s)	Duración (ciclos)	Frecuencia (Hertz)
		Inicio	Final	Max	Min					
16	Triangular	38		70	6	32	0,01		1000	5
17	Rampa		41				0,05	30		
18	Triangular	41		76	6	35	0,01		1000	5
19	Rampa		44				0,05	30		
20	Triangular	44		82	6	38	0,01		1000	5
21	Rampa		47				0,05	30		
22	Triangular	47		88	6	41	0,01		1000	5

### III.9 ENSAYO DE ULTRASONIDO

Una vez seleccionadas las probetas a ser ensayadas, se procede a la medición de los tiempos de viaje del pulso ultrasónico antes de la ejecución de los ensayos a compresión. Se calibrará el equipo, haciendo uso del elemento de calibración antes de cada medición y se realizarán tres mediciones de tiempo sobre cada probeta para obtener el promedio de las mismas. El transductor es separado del espécimen por un acoplador (grasa) colocado entre el traductor y la muestra, el acoplador sirve como conductor de la onda.



Figura 26 Ensayo de Ultrasonido en especímenes sin ensayar. (Elaboración propia)

En los cilindros de tamaños normalizados (30\*15 cm) se tomaron las lecturas antes del ensayo a compresión, siempre para cada una de las probetas con edades de curado 7, 14 y 28 días. Los ensayos se llevaron a cabo de acuerdo al “Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto” Norma COVENIN N°1681-80

### III.9.1 Ejecución del Ensayo CATS Ultrasonico

Se utilizaron traductores conectado a la máquina de ensayo, dichos traductores envían la información directamente a un computador el cual reproduce la onda gráficamente, permitiendo la visualización y evaluación del punto dentro de la curva donde se encuentra la velocidad de onda (P y S, dependiendo del caso). El transductor es separado del espécimen por un acoplador (miel 100% pura) que es colocado entre el transductor y la muestra, el acoplador sirve como conductor de la onda emitida durante la ejecución del ensayo.

El programa GCTS CATS ultrasónico determina las velocidades de ondas longitudinales y superficiales y además almacena las formas de estas ondas de manera digital. El sistema utiliza una tarjeta de la computadora para la adquisición de datos a alta velocidad y un paquete sofisticado de programas computacionales para el análisis de datos.

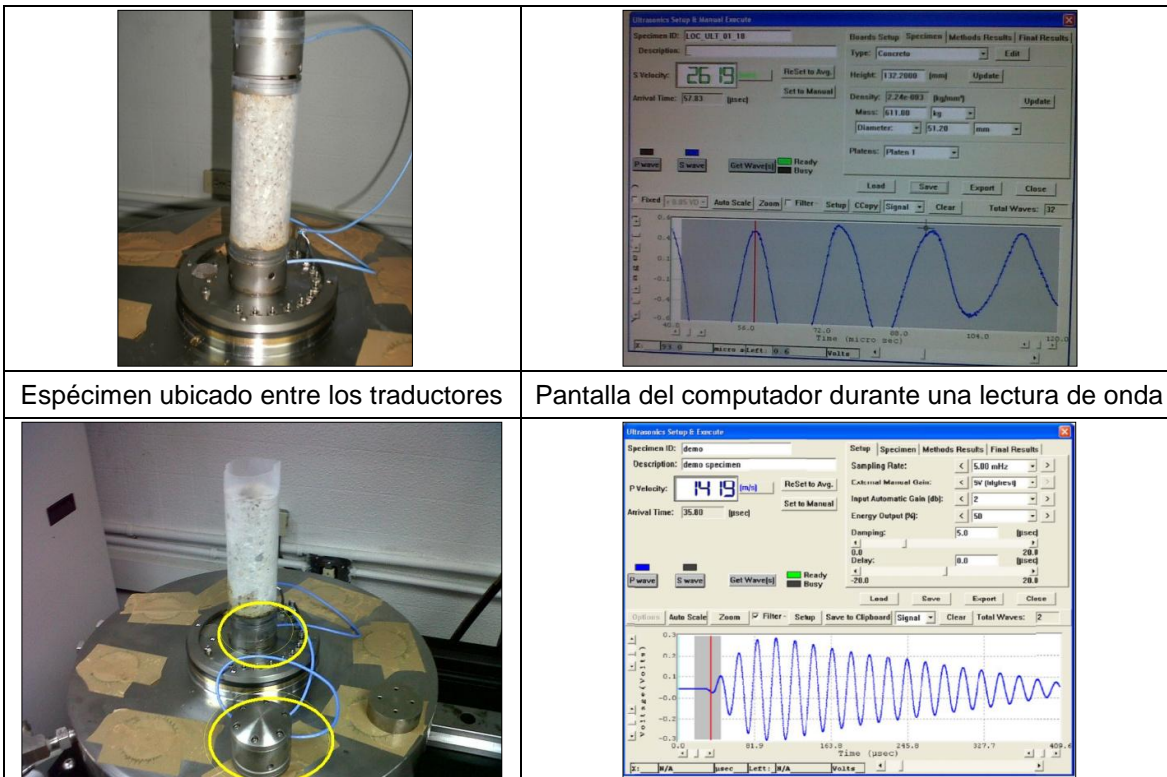


Figura 27 Ensayo CATS Ultrasonico. Elaboración propia.

### **III.10 ENSAYO LOCATI COMBINADO CON ENSAYO CATS ULTRASÓNICO**

La programación del ensayo conto con 61 fases de ejecución, constituidas por tres etapas:

Espera, en la cual se realizaron las medidas de pulso ultrasónico y a su vez el espécimen se encontraba sometido a carga constante. Esta etapa fue programada para finalizar de forma manual dándole paso a la siguiente fase. Una vez realizadas las medidas con el equipo de pulso ultrasónico (controlado por el computador como se explico anteriormente) la programación permitía seleccionar la opción de continuar a la siguiente fase.

Rampa, programada para generar periodos de incrementos de carga con un tiempo estipulado de 30 segundos, para ser en total 15 rampas de incremento de cargas;

LOCATI, fase durante la cual se establecieron 1000 ciclos de carga y descarga con frecuencia constante de 5Hz y de amplitud variable, iniciando con una amplitud de 11 kN con incrementos en cada una de ellas de 3kN hasta cumplir las 15 etapas LOCATI o hasta la ocurrencia de falla.

Tabla 12 Ensayo LOCATI combinado con ultrasonido. Programación. (Elaboración propia)

Fase	Nombre	Tipo De onda	Carga axial (kN)				Amplitud (kN)	Duración (s)	Duración (ciclos)	Frecuencia (Hz)
			Inicio	Final	Max	Min				
1	Espera 1	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
2	Rampa 1	Rampa	2	17	17	2	-	30	-	-
3	Espera 2	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
4	LOCATI 1	Triangular	17		28	6	11	-	1000	5
5	Espera 3	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
6	Rampa 2	Rampa		20	20		-	30	-	-
7	Espera 4	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
8	LOCATI 2	Triangular	20		34	6	14	-	1000	5
9	Espera 5	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
10	Rampa 3	Rampa		23	23		-	30	-	-
11	Espera 6	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
12	LOCATI 3	Triangular	23		40	6	17	-	1000	5
13	Espera 7	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
14	Rampa 4	Rampa		26	26		-	30	-	-
15	Espera 8	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
16	LOCATI 4	Triangular	26		46	6	20	-	1000	5
17	Espera 9	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
18	Rampa 5	Rampa		29	29		-	30	-	-
19	Espera 10	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
20	LOCATI 5	Triangular	29		52	6	23	-	1000	5
21	Espera 11	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
22	Rampa 6	Rampa		32	32		-	30	-	-
23	Espera 12	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
24	LOCATI 6	Triangular	32		58	6	26	-	1000	5
25	Espera 13	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
26	Rampa 7	Rampa		35	35		-	30	-	-
27	Espera 14	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
28	LOCATI 7	Triangular	35		64	6	29	-	1000	5
29	Espera 15	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
30	Rampa 8	Rampa		38	38		-	30	-	-
31	Espera 16	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
32	LOCATI 8	Triangular	38		70	6	32	-	1000	5
33	Espera 17	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
34	Rampa 9	Rampa		41	41		-	30	-	-
35	Espera 18	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
36	LOCATI 9	Triangular	41		76	6	35	-	1000	5
37	Espera 19	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
38	Rampa 10	Rampa		44	44		-	30	-	-
39	Espera 20	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
40	LOCATI 10	Triangular	44		82	6	38	-	1000	5
41	Espera 21	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
42	Rampa 11	Rampa		47	47		-	30	-	-
43	Espera 22	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
44	LOCATI 11	Triangular	47		88	6	41	-	1000	5
45	Espera 23	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
46	Rampa 12	Rampa		50	50		-	30	-	-
47	Espera 24	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
48	LOCATI 12	Triangular	50		94	6	44	-	1000	5
49	Espera 25	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
50	Rampa 13	Rampa		53	53		-	30	-	-
51	Espera 26	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
52	LOCATI 13	Triangular	53		100	6	47	-	1000	5
53	Espera 27	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
54	Rampa 14	Rampa		56	56		-	30	-	-
55	Espera 28	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
56	LOCATI 14	Triangular	56		106	6	50	-	1000	5
57	Espera 29	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
58	Rampa 15	Rampa		59	59		-	30	-	-
59	Espera 30	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-
60	LOCATI 15	Triangular	59		112	6	53	-	1000	5
61	Espera 31	Constante	Constante				-	Hasta finalizar la lectura de ultrasonido	-	-

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### IV.1 LECHADA DE INYECCIÓN DE OBRAS SUBTERRANEAS

Para la ejecución de este TEG es sumamente importante poder establecer comparaciones de los resultados obtenidos con muestras de morteros de inyección especificados para obras subterráneas, por esta razón se conto con la ventaja de poder obtener valores de referencias a partir de dos tipos de muestras de mortero de inyección.

##### IV.1.1 Ensayo de Compresión Simple

Se enviaron dos muestras de cada espécimen de lechada utilizada en las inyecciones, los especímenes enviados corresponden a las denominaciones:

Espécimen MII: lechada de cemento con micro-sílice para aumentar resistencia, solución adoptada inicialmente para evitar falla en inyecciones, este material constituye el material de referencia

Espécimen 2R: esta lechada corresponde al material original que se utiliza que cumple con capacidad para cargas estáticas, pero no cargas de tipo dinámico.

Se presenta a continuación los resultados del ensayo a compresión simple y de ultrasonido de las muestras con el reporte correspondiente de los valores representativos para las muestras de referencia.



## ESPÉCIMEN MII

Tabla 13 Datos Espécimen MII (Elaboración propia)

Datos de Espécimen MII		
Altura	117,3	(mm)
Diámetro	51	(mm)
Área	20,43	cm <sup>2</sup>
Volumen	239,62	cm <sup>3</sup>

Tabla 14 Resultados de Ensayo a Compresión. Espécimen MII. Elaboración propia

Duración: 1528 s			
Ea - Deformación Axial (%)		Sd - Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max:	1,80	Max:	264,54
Min:	0,00	Min:	8,18

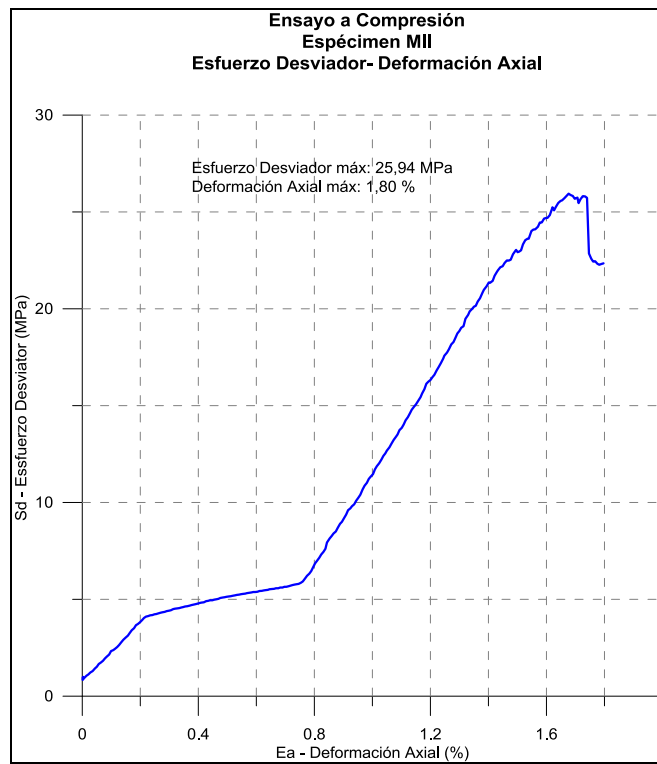


Figura 28 Ensayo a Compresión, Espécimen MII. Esfuerzo Desviado- Deformación Axial  
Elaboración propia

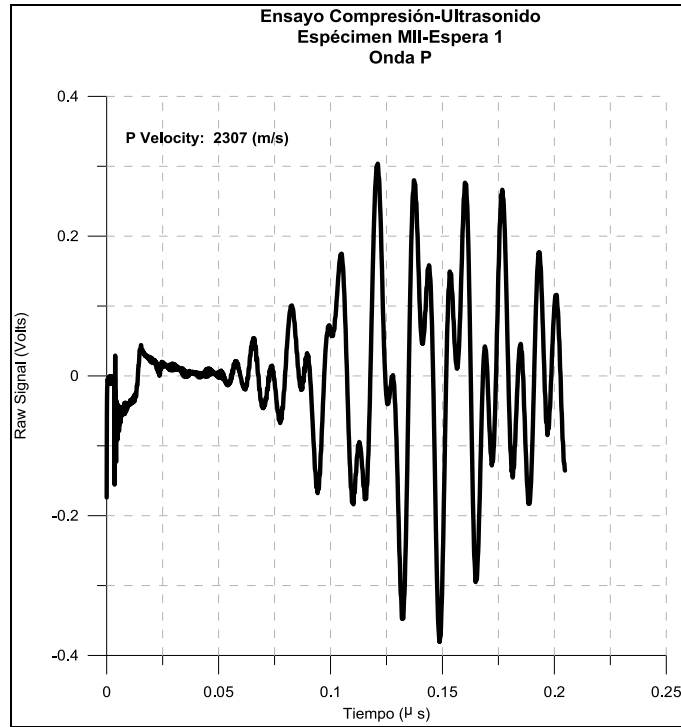


Figura 29 Ensayo de Ultrasonido, Onda P. Especimen MII. Elaboración propia

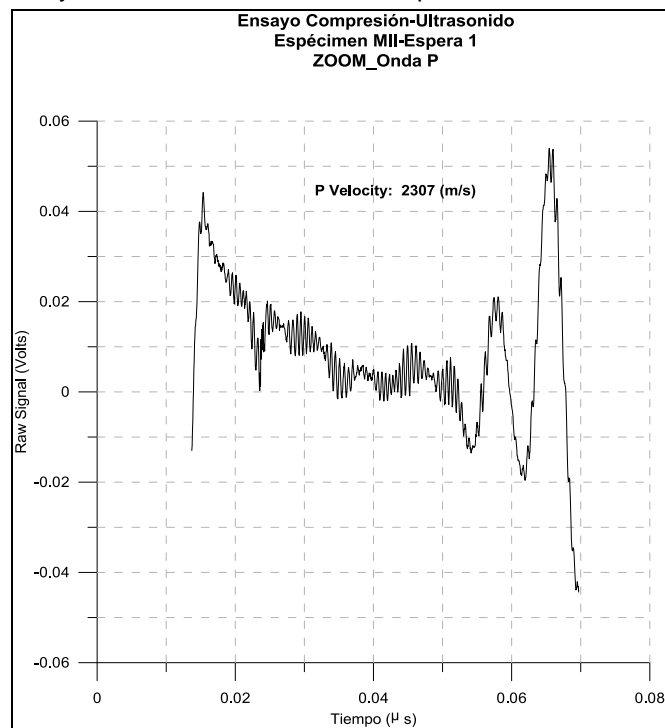


Figura 30 Ensayo de Ultrasonido, ZOOM\_Onda P. Especimen MII. Elaboración propia

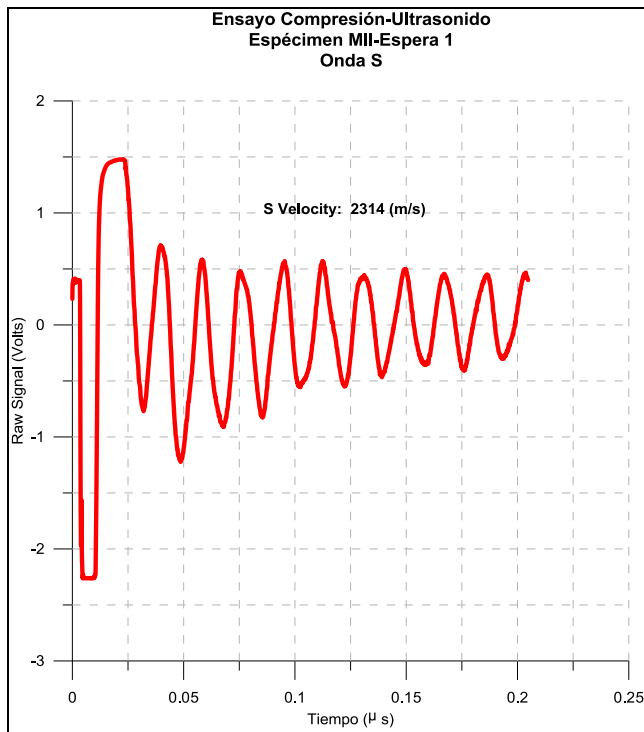


Figura 31 Ensayo de Ultrasonido, Onda S. Espécimen MII. Elaboración propia

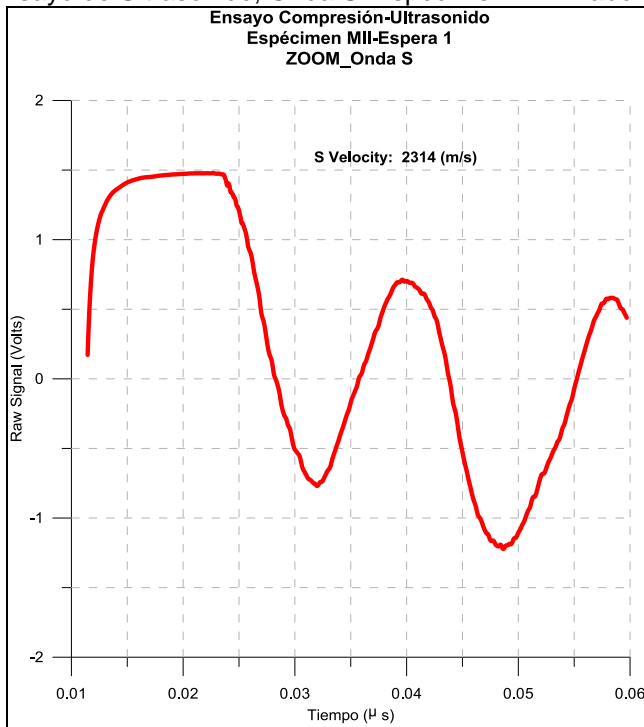


Figura 32 Ensayo de Ultrasonido, ZOOM\_Onda S. Espécimen MI. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 2R

Tabla 15 Datos Espécimen 2R. Elaboración propia.

Datos de Espécimen 2R		
Altura	115,50	(mm)
Diámetro	50,80	(mm)
Área	20,27	cm <sup>2</sup>
Volumen	234,10	cm <sup>3</sup>

Tabla 16 Resultados de Ensayo a Compresión. Espécimen 2R. Elaboración propia

Duración: 1069,4 s			
Ea - Deformación Axial (%)		Sd - Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max:	2,95	Max:	42,67
Min:	1,59	Min:	9,40

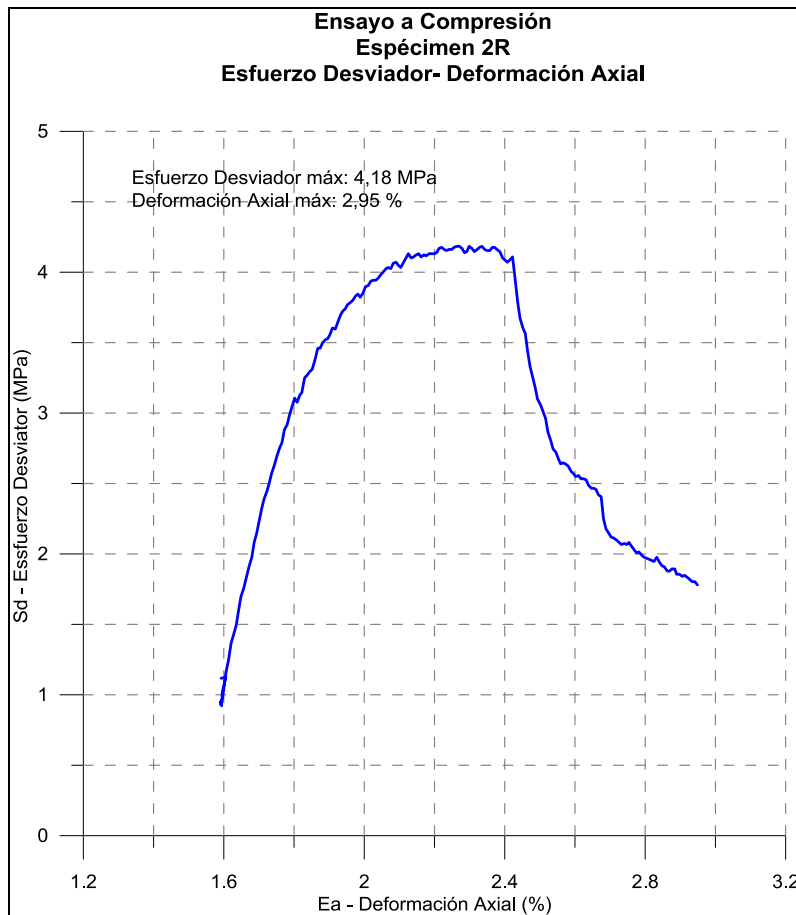


Figura 33 Ensayo a Compresión, Espécimen 2R. Esfuerzo Desviado- Deformación Axial.  
Elaboración propia

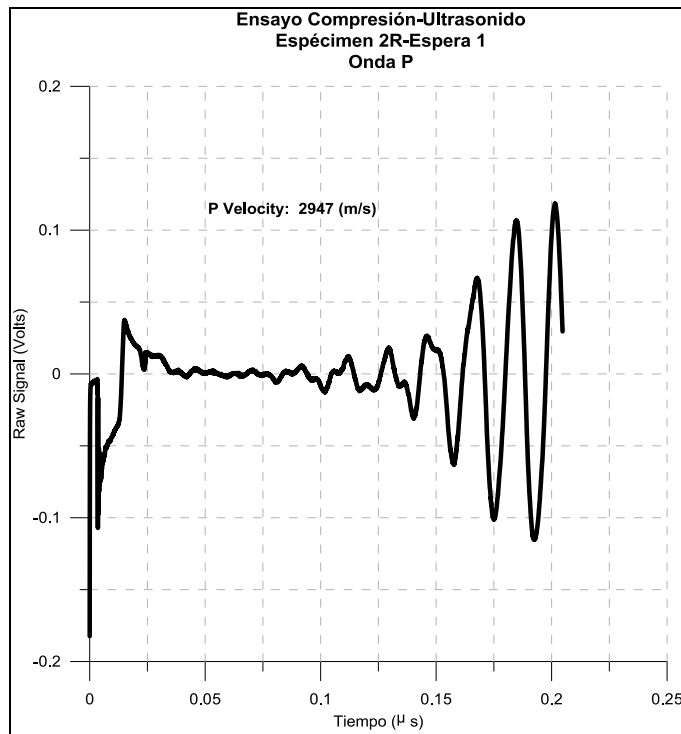


Figura 34 Ensayo de Ultrasonido, Onda P. Espécimen 2R. Elaboración propia

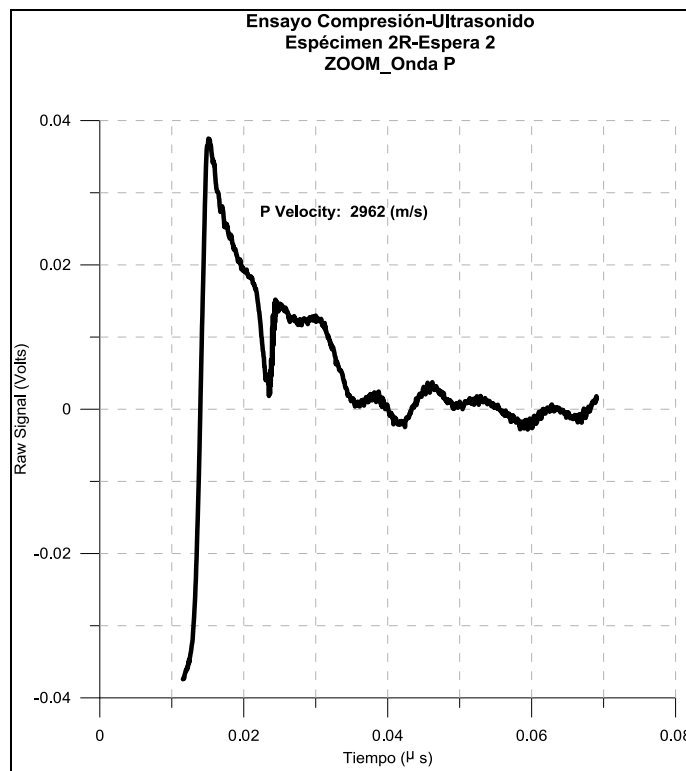


Figura 35 Ensayo de Ultrasonido, ZOOM\_Onda P. Espécimen 2. Elaboración propia

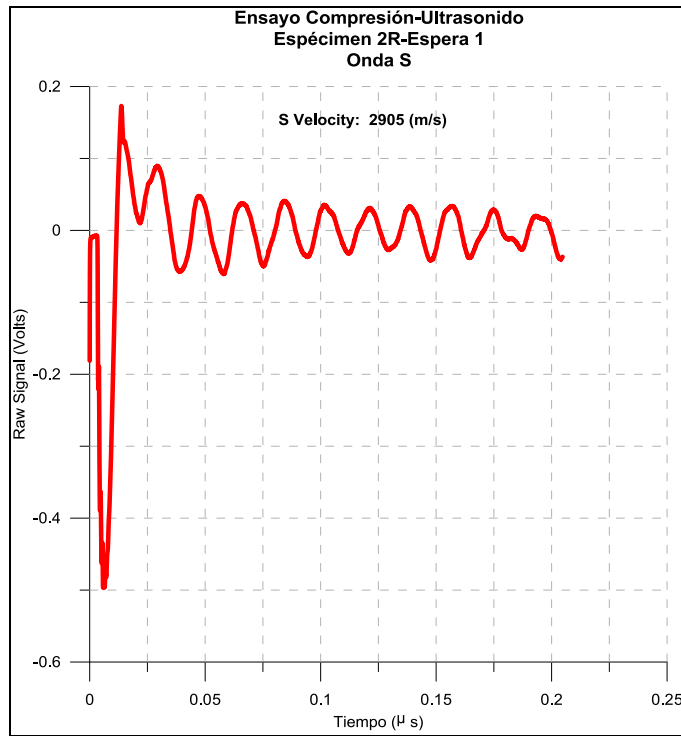


Figura 36 Ensayo de Ultrasonido, Onda S. Especimen 2R. Elaboración propia

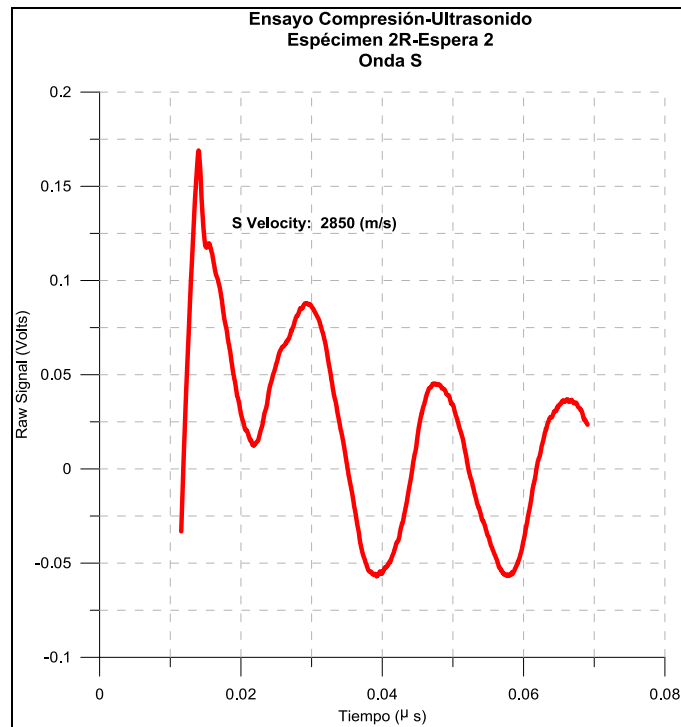


Figura 37 Ensayo de Ultrasonido, ZOOM\_Onda S. Especimen 2. Elaboración propia.

Con base en los resultados de los ensayos podemos inferir que el aumento establecido para tratar de controlar los problemas originados por carga dinámica es del orden de 6 veces mayor al especificado para carga estática (264 kg/cm<sup>2</sup> espécimen MII y 42 kg/cm<sup>2</sup> en espécimen 2R), sin embargo, la velocidad de ondas de ultrasonido P y S son muy similares.

El material suministrado corresponde a información confidencial por lo cual no se conoce la composición de las lechadas y sólo se tiene de referencia los valores de los ensayos realizados a las muestras.

En la gráfica de compresión simple se observa una etapa inicial que corresponde al periodo de asiento de carga de los implementos del equipo, establecida esta etapa es que comienza el ensayo propiamente dicho. Con base en la observación anterior que se repite en todos los ensayos, se debe realizar la interpretación sacando esta etapa inicial del ensayo.

#### **IV.1.2 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (BRASILERO)**

El ensayo brasilero lo que refleja es la capacidad del material a tracción, este esfuerzo se induce de forma indirecta, del análisis de los resultados para las dos muestras se concluye que la capacidad en tracción indirecta es en términos prácticos muestran gran diferencia. El resultado anterior, presenta un comportamiento de esfuerzo a tracción en el orden del 10%, por lo que se puede establecer que lo que se requiere es mayor resistencia a compresión y tracción.

## ESPÉCIMEN MII

Tabla 17 Datos del espécimen MII. Elaboración propia

Espécimen MII	
Datos de la muestra	
Altura	21,6 mm
Diámetro	51,00 mm
Área	20,43 cm <sup>2</sup>
Volumen	43,95 cm <sup>3</sup>

Tabla 18 Resultados obtenidos en el ensayo de Tracción indirecta para el espécimen MII.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
11,5		1	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	496,76	Max	0,12
Min	99,66	Min	0
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,09	Max	23,26
Min	0	Min	14,43

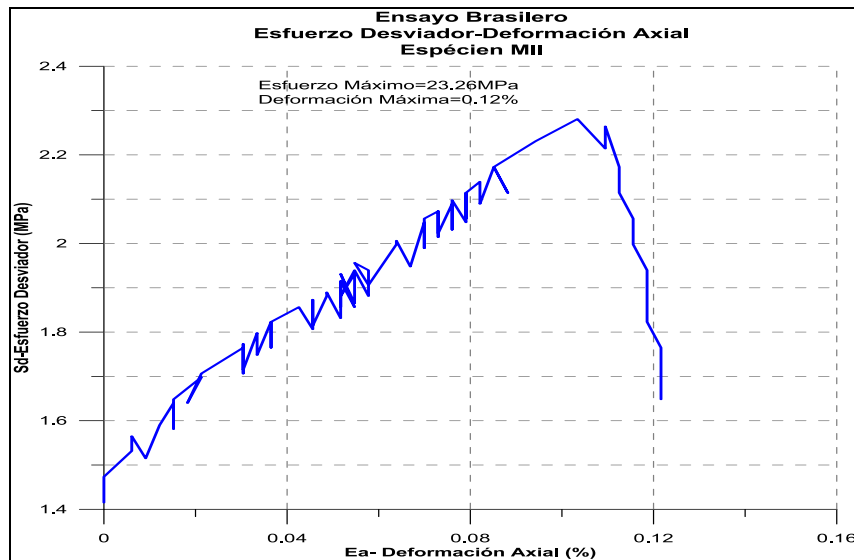


Figura 38 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen MII, sometido a Tracción Indirecta  
Elaboración propia



## ESPÉCIMEN 2R

Tabla 19 Datos del espécimen 2R. Elaboración propia

Espécimen 2R	
Datos del Espécimen	
Altura	53,46 MM
Diámetro	50,94 MM
Área	27,23CM <sup>2</sup>
Volumen	145,58 CM <sup>3</sup>

Tabla 20 Resultados obtenidos en el Ensayo de Tracción indirecta para el espécimen 2R.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
12,4		1	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	303,66	Max	0,14
Min	222,68	Min	0,00
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,07	Max	7,09
Min	0,00	Min	5,64

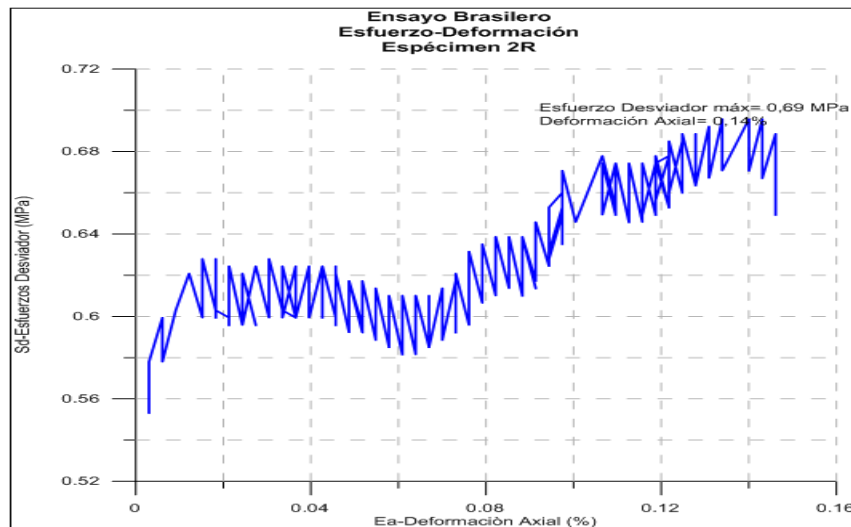


Figura 39 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 2R, sometido a Tracción Indirecta  
Elaboración propia.

### **IV.1.3 ENSAYO LOCATI**

El ensayo acelerado de Fatiga denominado LOCATI, lo que pretende es establecer la capacidad que tiene el material al ser sometido a cargas cíclicas continuas que indiquen la capacidad de fatiga del material.

En la Figura 40 se presenta el resultado del ensayo sobre el espécimen MII donde se observa que la muestra resiste prácticamente tres etapas crecientes de umbrales de esfuerzos de mil ciclos cada uno, en la tercera etapa el material falla y se aprecia que la deformación antes de la falla aumenta progresivamente. Lo particular de la falla es que el esfuerzo de falla máximo es del orden del 53% del esfuerzo en compresión simple (carga estática).

La Figura 41 presenta la gráfica esfuerzo-deformación del ensayo LOCATI, donde se observa que las dos primeras etapas se mantienen estables y en la tercera etapa se aumenta en forma creciente la deformación y se amplían los ciclos de histéresis, este comportamiento indica que el material está plastificando y se degrada progresivamente.

## ESPÉCIMEN MII

Tabla 21 Datos del Espécimen MII. Elaboración propia

Datos de Espécimen MII		
Altura	125,30	(mm)
Diámetro	51,00	(mm)
Área	20,43	cm <sup>2</sup>
Volumen	255,97	cm <sup>3</sup>

Tabla 22 Resultados obtenidos en el Ensayo LOCATI para el espécimen MII. Elaboración propia

Duración: 689,8 s			
Ea - Deformación Axial (%)	Sd - Esfuerzo Desviador ((kgf/cm <sup>2</sup> )		
Max:	1,60	Max:	158,28

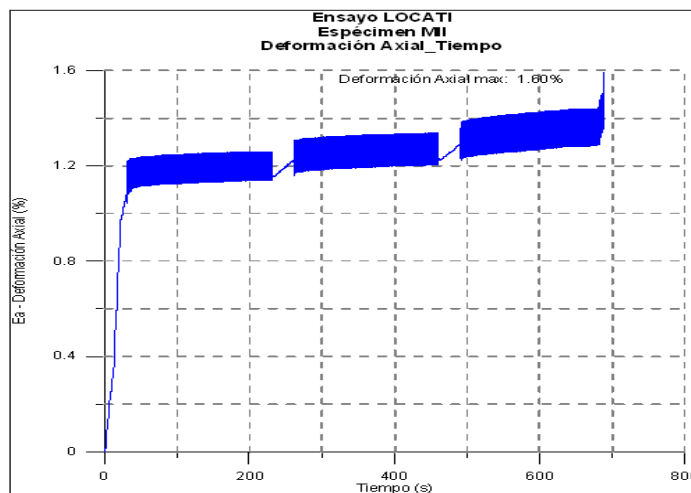


Figura 40 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen MII. Ensayo LOCATI  
Elaboración propia

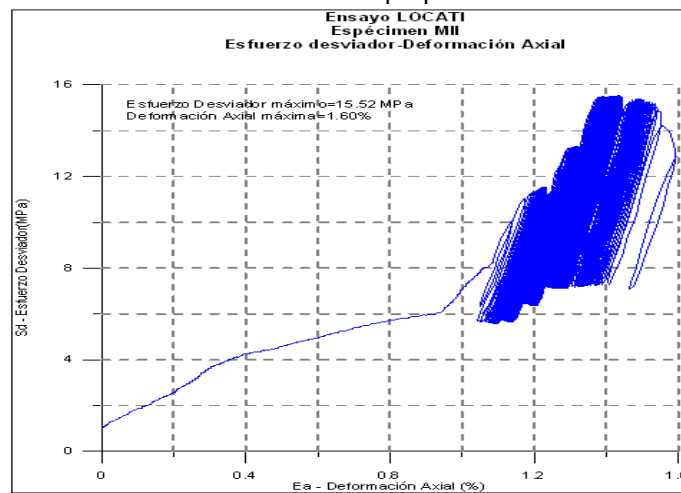


Figura 41 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen MII. Ensayo LOCATI  
Elaboración propia

En el caso del espécimen 2R no resiste ciclos de carga (FIGURA 42 y FIGURA 43), falla básicamente antes de comenzar los ciclos de carga, en otras palabras no es el material de referencia para las comparaciones que se van a realizar con el material propuesto. Para el caso de este espécimen se ensayaron dos muestras para verificar de forma contundente su comportamiento.

Los ensayos deben ir dirigidos no específicamente al estado de carga estático, debe darse prioridad al comportamiento cíclico (dinámico) de la muestra.

## ESPÉCIMEN 2R\_01

Tabla 23 Datos del Espécimen 2R\_01. Elaboración propia

Datos de Espécimen 2R_01		
Altura	114,50	(mm)
Diámetro	50,90	(mm)
Área	20,35	cm <sup>2</sup>
Volumen	232,99	cm <sup>3</sup>

Tabla 24 Resultados obtenidos en el Ensayo LOCATI para el espécimen 2R\_01. Elaboración propia

Duración: 19,8 s			
Ea - Deformación Axial (%)		Sd - Esfuerzo Desviador ((kgf/cm <sup>2</sup> ))	
Max:	1,97	Max:	53,67
Min:	0,00	Min:	10,51

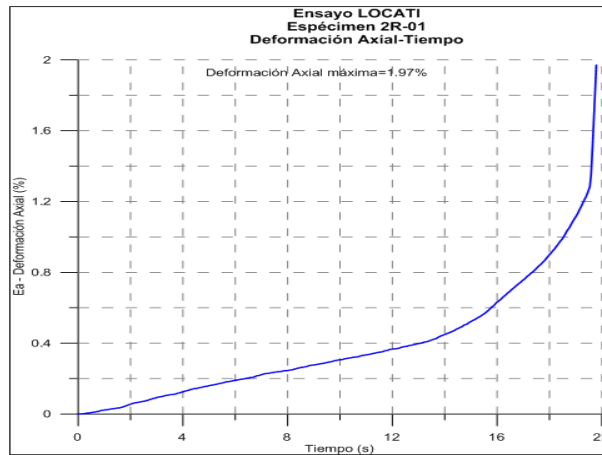


Figura 42 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 2R\_01. Ensayo LOCATI  
Elaboración propia

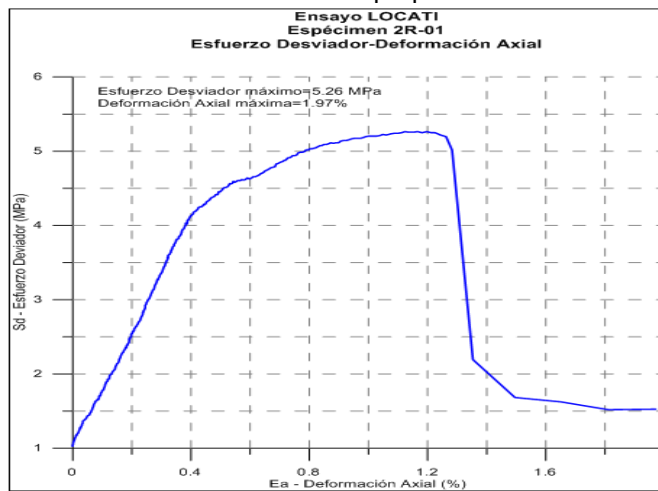


Figura 43 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 2R\_01. Ensayo LOCATI  
Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 2R\_02

Tabla 25 Datos del Espécimen 2R\_02. Elaboración propia

Datos de Espécimen 2R_02		
Altura	113,90	(mm)
Diámetro	51,10	(mm)
Área	20,51	cm <sup>2</sup>
Volumen	233,59	cm <sup>3</sup>

Tabla 26 Resultados obtenidos en el Ensayo LOCATI para el espécimen 2R\_02.  
Elaboración propia

Duración: 18,54s			
Ea - Deformación Axial (%)		Sd - Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max:	1,89	Max:	51,28
Min:	0,00	Min:	7,85

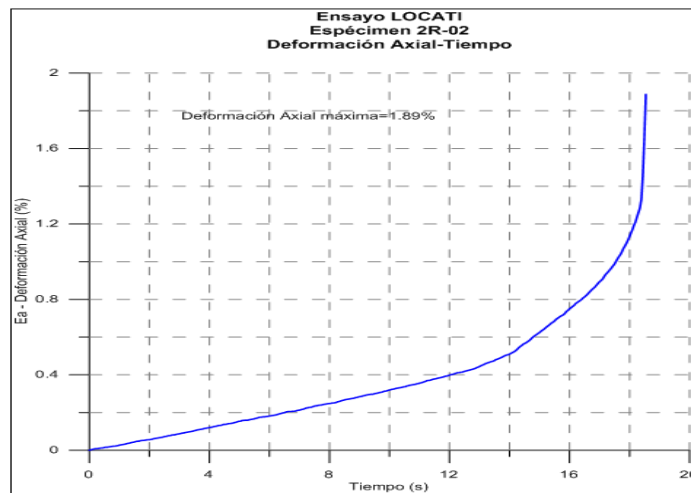


Figura 44 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 2R\_02. Ensayo LOCATI  
Elaboración propia

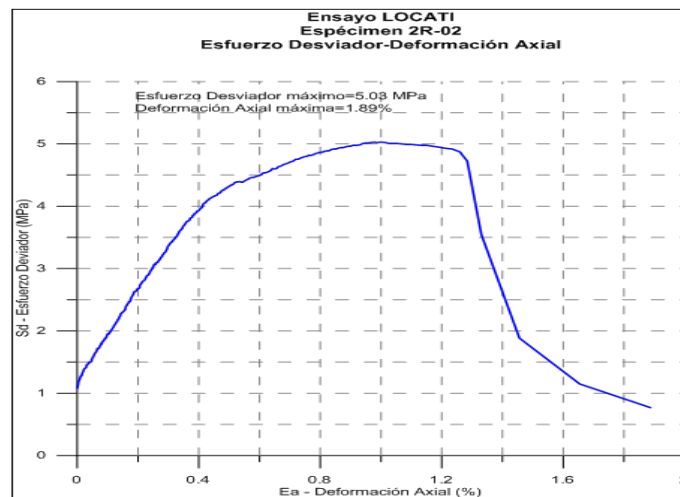


Figura 45 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 2R\_02. Ensayo LOCATI  
Elaboración propia

## IV.2 ESPECIFICACIONES DE LAS CARACTERISTICAS DEL AGREGADO FINO

### IV.2.1 Granulometría

La granulometría propuesta corresponde a un material fino constituido por una mezcla a partes iguales de arena y arcillo, la inclusión del arcillo es para ajustar la granulometría a un material con mejor comportamiento resistente según el Manual del Concreto Estructural (Porrero)

Tabla 27: Porcentaje de pasantes del agregado fino utilizado en la mezcla. Elaboración Propia

Tamiz (pulg)	* <sup>5</sup> Máximo Pasante %	* <sup>5</sup> Mínimo Pasante %	% pasante Arena	% Pasante Arcillo	% Promedio (Arena y Arcillo)
(1/4)	100	100	100	100	100
# 4	100	85	78,72	84,256	89,25
# 8	95	60	67,5	70,756	61,9
# 16	80	40	52,66	60,224	40,84
# 30	60	20	36,8	52,864	22,62
# 50	30	8	19,02	49,06	10,62
# 100	10	2	6,64	47,732	4,26
# 200	5	0	0,72	47,588	0,5

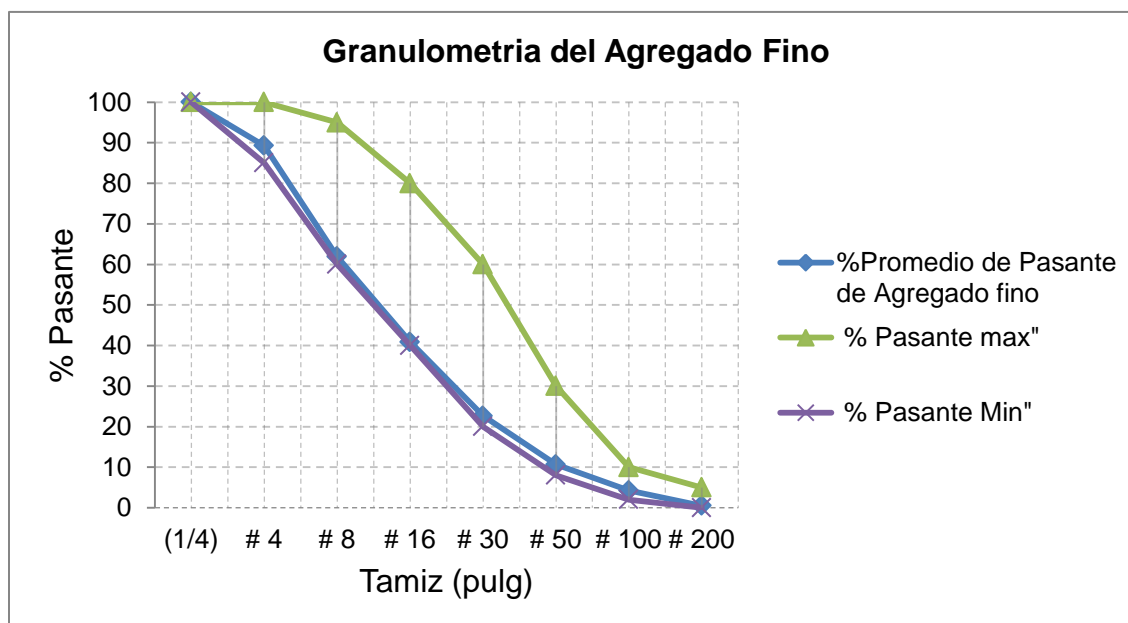


Figura 46 Gráfico granulométrico del agregado fino. Elaboración propia

<sup>5</sup>, Valores recomendados por (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009) en su Tabla VI.1

Se puede notar en el gráfico anterior que el agregado utilizado posee una buena distribución del tamaño de sus granos, el porcentaje de pasantes en cada tamiz se encuentra dentro de los valores establecidos en el “Manual del Concreto Estructural” (Tabla VI.1). Observando el % de pasante para ambos componentes del agregado se puede establecer que el arrocillo complementa el material.

#### IV.2.2 Contenido de Humedad

Tabla 28: Contenido de humedad. Elaboración propia.

Agregado Fino		
Ww	574,3	gr
Ws	547	gr
$\omega$	4,99	%

El valor del contenido de humedad nos permite corregir el valor del agua que se utiliza en la mezcla.

#### IV.2.3 Peso específico y porcentaje de absorción

Tabla 29: Peso específico y porcentaje de absorción de agregado fino (arena). Elaboración propia

Peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino (COVENIN 268)	
Peso en el aire de la muestra seca W1 (gr)	484,90
Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca W (gr)	500,00
Peso del picnómetro con agua Wa (gr)	1275,80
Peso del picnómetro con la muestra y el agua Wp (gr)	1582,50
Peso específico Saturado con superficie seca $\gamma_s$ (gr)	2,51
Porcentaje de absorción A (%)	3,11

Comparando el valor obtenido del peso específico saturado con superficie seca con los valores usuales de las relaciones peso/volumen de los agregados no livianos (tabla iii.7 “manual de concreto estructural”, porrero 2008), se tiene que dicho valor es de 2,51 gr/ml encontrándose justo sobre el límite inferior establecido (2,50gr/ml). El porcentaje de absorción de la arena fue de 3,11% motivado a la gran capacidad de absorción que caracteriza a las arenas.



### IV.3 ESPECIFICACIONES DE LA MEZCLA UTILIZADA

#### IV.3.1 Proporciones del diseño de mezcla utilizado

Tabla 30 Proporciones del Diseño de Mezcla. Elaboración propia

Componente	Unitario	Requerido	Unidades
Concreto	1	0,07	m <sup>3</sup>
Agregado fino	725,2	50,75	Kg
Arrocillo	725,2	50,75	Kg
Cemento	684,3	47,9	Kg
Agua	215,8	15,1	lts

#### IV.3.2 Medición de asentamiento (T) por el cono de Abrams.

Tabla 31: Asentamiento de la Mezcla. Elaboración propia

Asentamiento T	Unidad
7	cm

#### IV.3.3 Densidad del Microconcreto en estado endurecido

Tabla 32: Densidad calculada para cada uno de los Cilindros Normalizados. Elaboración propia

Espécimen	Edad (Días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Cilindro 1	7	15,000	30,4	12,22	0,00537	2273,96
Cilindro 2	14	15,067	30,4	12,40	0,00542	2288,02
Cilindro 3	28	15,033	30,5	12,38	0,00541	2287,13

Se puede observar que a medida que transcurren los días de curado la densidad de las probetas presenta pequeñas variaciones, pudiéndose establecer una densidad promedio para el microconcreto obtenido de 2283,03 kg/m<sup>3</sup>.

### IV.4 PRUEBA DE ULTRASONIDO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Tabla 33: Resultados de resistencia a compresión y ultrasonido en cilindros normalizados. Elaboración propia

Espécimen	Edad (Días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga Máx (kg)	Resistencia a Compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ultrasonido	
							Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
Cilindro 1	7	15,000	30,4	12,22	62000	350,848	0,0000741	4102,56
Cilindro 2	14	15,067	30,4	12,4	69600	390,378	0,0000726	4187,33
Cilindro 3	28	15,033	30,5	12,38	78000	439,434	0,0000709	4301,83

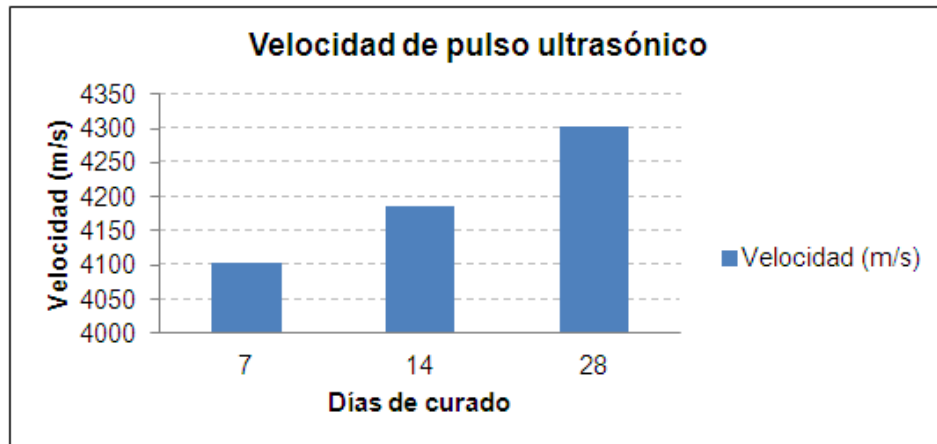


Figura 47 Rango de velocidades de pulso ultrasónico para cilindros ensayados

El rango de velocidades obtenidas permite establecer la calidad del microconcreto en “bueno”, puesto que a mayor velocidad se corresponde una mayor homogeneidad del mismo y por supuesto una mayor densidad.

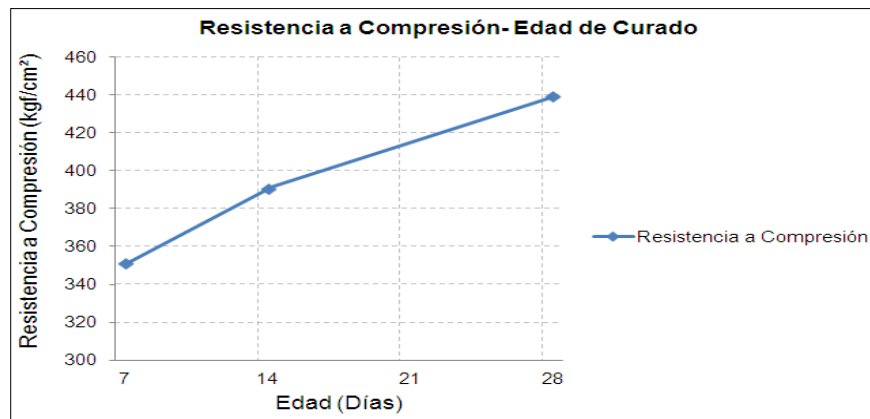


Figura 48 Resistencia a compresión en función de los días de curado. Elaboración propia

En la grafica anterior se puede observar como la resistencia de la mezcla fue aumentando progresivamente con el tiempo. Para la edad de 7 días, la resistencia alcanzada fue de 350 kgf/cm<sup>2</sup> alcanzando la resistencia de diseño y a su vez representa el 79,8% de la resistencia total alcanzada a los 28 días.

A los 14 días la mezcla desarrollo una resistencia a compresión de 390 kgf/cm<sup>2</sup>, representando un 88,8% de la resistencia total. Para los 28 días la resistencia alcanzada fue de 439 kgf/cm<sup>2</sup> dando un valor superior a la resistencia teórica de 350 kgf/cm<sup>2</sup>, siendo un 20% mayor a la esperada.

## **IV.5 ENSAYOS REALIZADOS A ESPÉCIMENES DE MICROCONCRETO**

A continuación se presentan los ensayos que se realizaron sobre las muestras de microconcreto propuesto como material de inyección, las pautas de esta propuesta es mejorar la resistencia a carga estática y extender la capacidad a carga dinámica aumentando el nivel de límite de fatiga del material patrón (lechada MII).

### **IV.5.1 Ensayo a Compresión Simple**

Se realizaron 5 ensayos de compresión de probetas de microconcreto para establecer la resistencia del material, especificar con base en sus resultados las pautas para los ensayos acelerados de Fatiga (Método de LOCATI) y las comparaciones correspondientes.

A continuación se presentan los resultados, se debe tener presente que la primera etapa del ensayo corresponde al periodo de asiento de carga de los implementos del equipo, establecida esta etapa es que comienza el ensayo propiamente dicho. Con base en la observación anterior que se repite en todos los ensayos, se debe realizar la interpretación sacando esta etapa inicial del ensayo.

## ESPÉCIMEN 1

Tabla 34 Compresión simple. Datos del Espécimen 1. Elaboración propia

Espécimen 1	
Datos del Espécimen	
Altura	133,7 mm
Diámetro	50,6mm
Área	20,11 cm <sup>2</sup>
Volumen	268,86 cm <sup>3</sup>

Tabla 35: Resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple para el espécimen 1.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
90,5		1	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	7131,78	Max	1,15
Min	216,18	Min	0,03
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	1,54	Max	353,94
Min	0,04	Min	10,10

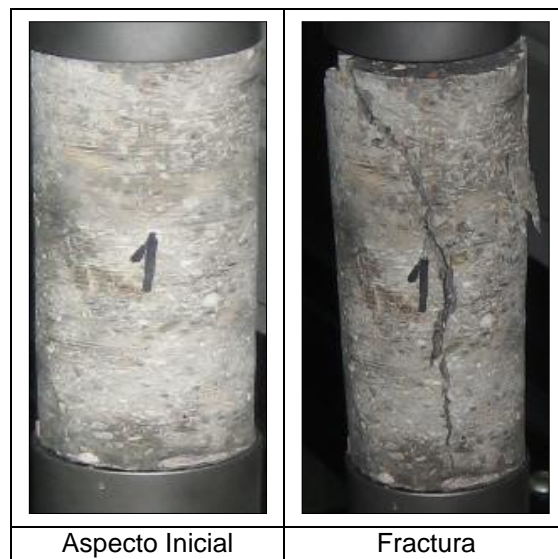


Figura 49 Ensayo de Compresión Simple. Espécimen 1  
Elaboración propia

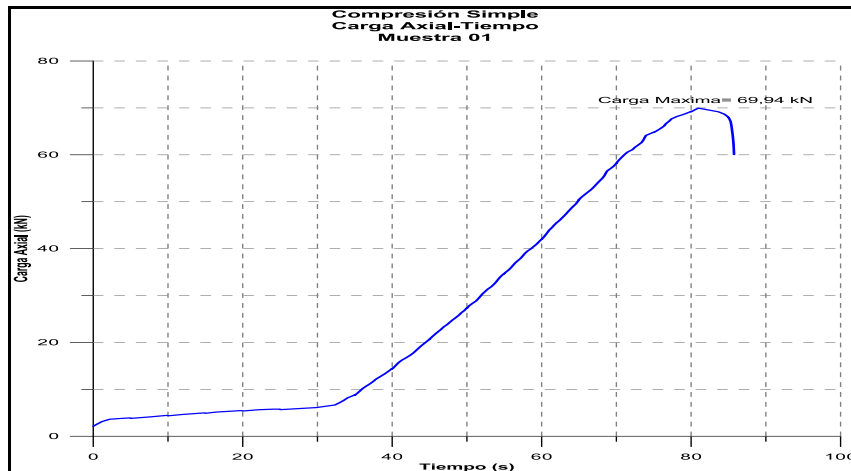


Figura 50 Carga Axial-Tiempo. Especimen 1, sometido a compresión Simple. Elaboración propia

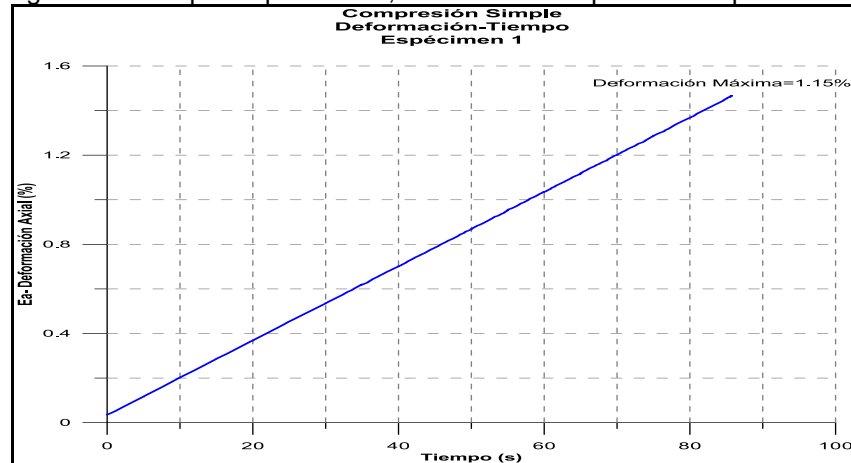


Figura 51 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 1, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

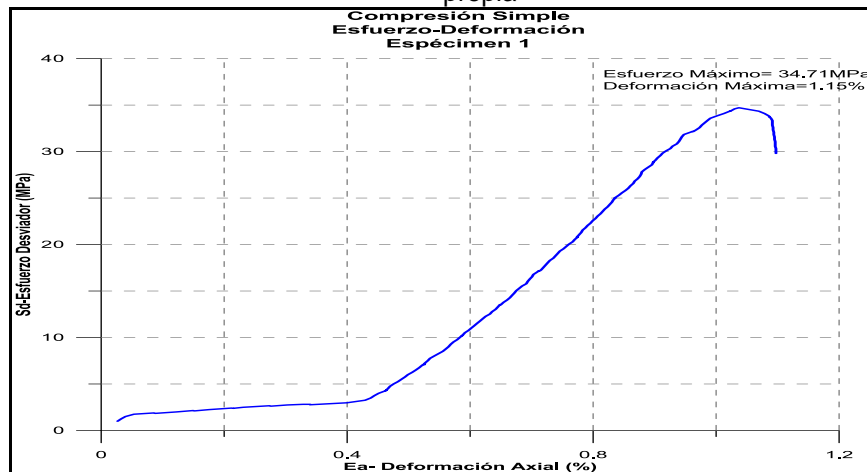


Figura 52 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 1, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 2

Tabla 36 Compresión simple. Datos del Espécimen 2. Elaboración propia

Espécimen 2	
Datos del Espécimen	
Altura	133,5 mm
Diámetro	50,4 mm
Área	22,89 cm <sup>2</sup>
Volumen	268,86 cm <sup>3</sup>

Tabla 37 Resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple para el espécimen 2.

Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
84,5		1	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	7578,41	Max	1,06
Min	225,35	Min	0,03
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	1,44	Max	371,07
Min	0,04	Min	0,38



Figura 53 Ensayo de Compresión Simple. Espécimen 2. Elaboración propia

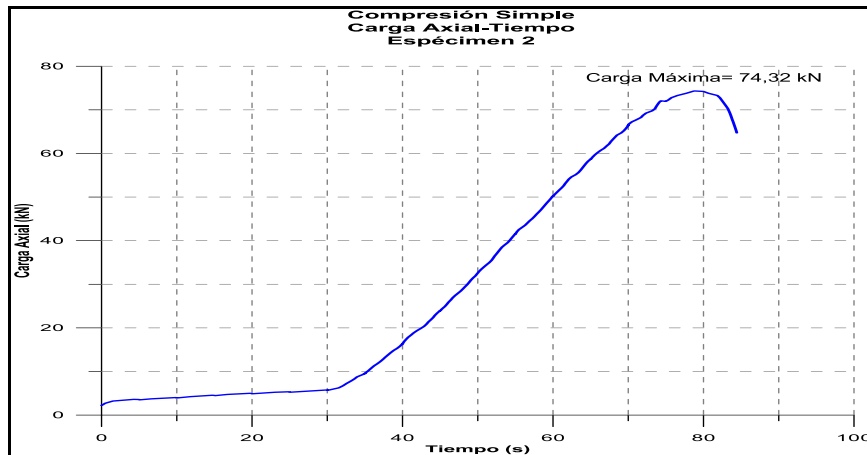


Figura 54 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 2, sometido a compresión Simple. Elaboración propia

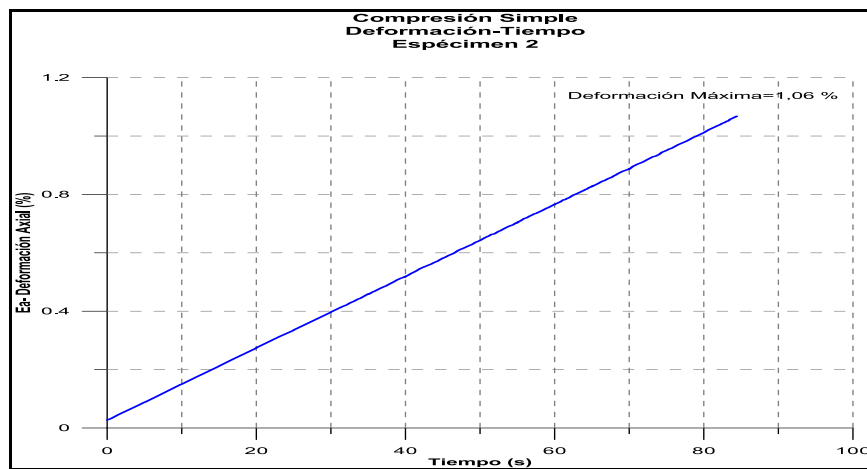


Figura 55 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 2, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

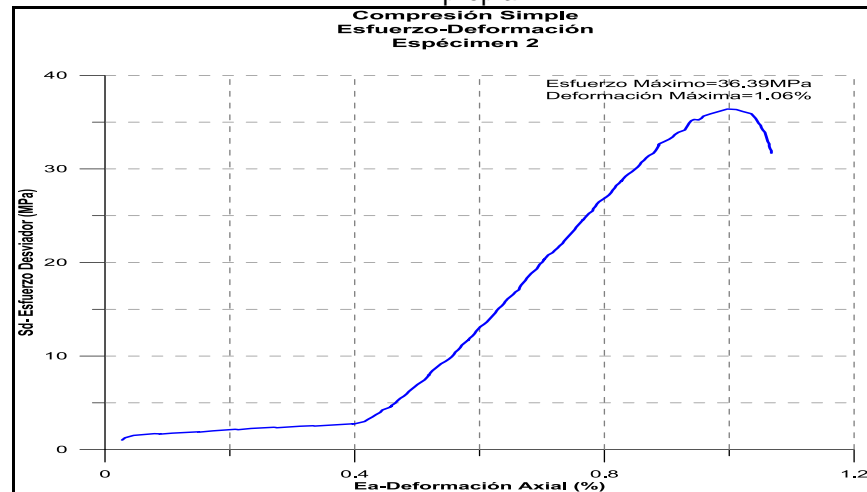


Figura 56 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 1, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

### ESPÉCIMEN 3

Tabla 38 Compresión simple. Datos del espécimen 3. Elaboración propia

Espécimen 3	
Datos del Espécimen	
Altura	133,6 mm
Diámetro	51 mm
Área	20,43 cm <sup>2</sup>
Volumen	272,92 cm <sup>3</sup>

Tabla 39: Resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple para el espécimen 3. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
130,5		1	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	6139,61	Max	0,78
Min	225,35	Min	0,01
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	1,04	Max	299,90
Min	0,01	Min	10,30

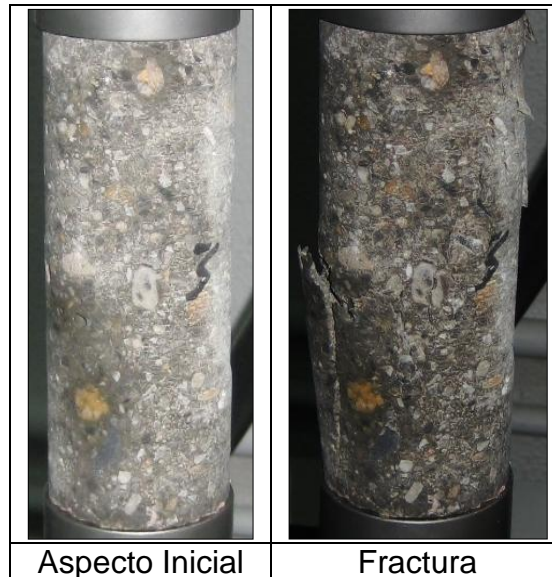


Figura 57 Ensayo de Compresión Simple. Espécimen 3. Elaboración propia



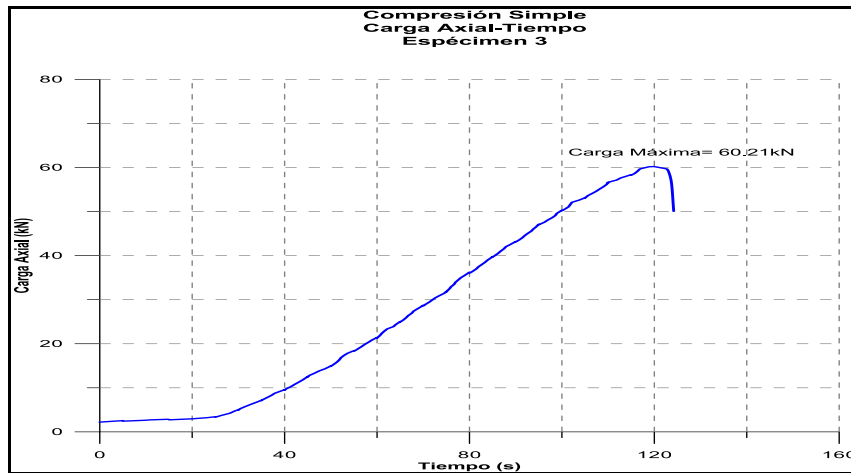


Figura 58 Carga Axial-Tiempo. Especimen 3, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

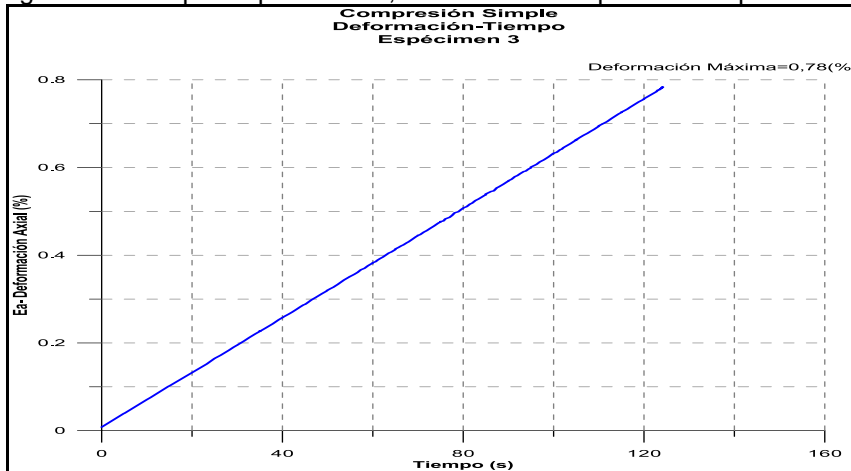


Figura 59 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 3, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

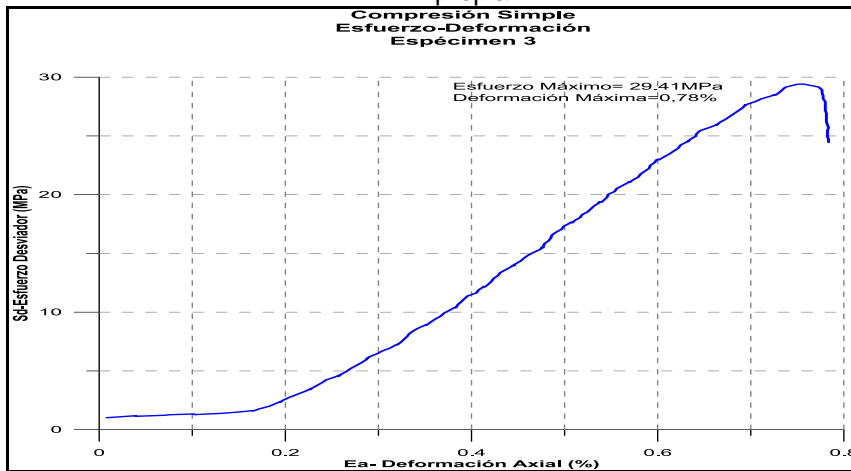


Figura 60 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 3, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 4

Tabla 40 Compresión simple. Datos del espécimen 4. Elaboración propia

Espécimen 4	
Datos del Espécimen	
Altura	134,5 mm
Diámetro	51 mm
Área	20,43cm <sup>2</sup>
Volumen	274,76 cm <sup>4</sup>

Tabla 41 Resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple para el espécimen 4.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
218,3		1	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	6617,85	Max	1,06
Min	220,26	Min	0,00
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,90	Max	323,35
Min	0,00	Min	10,30

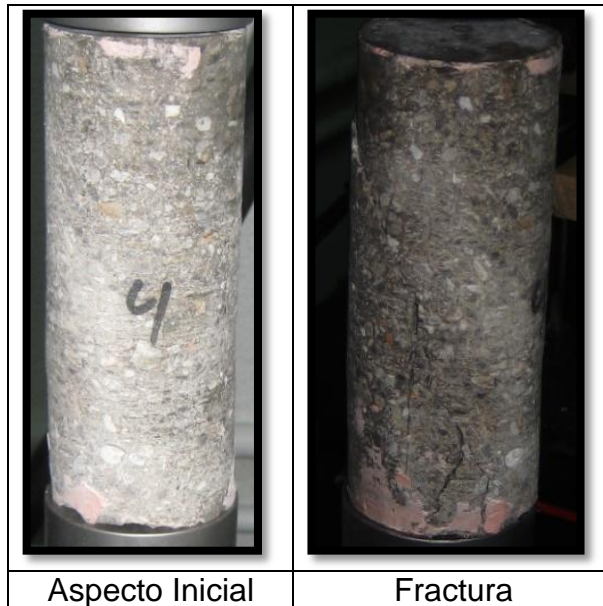


Figura 61 Ensayo de Compresión Simple. Espécimen 4. Elaboración propia

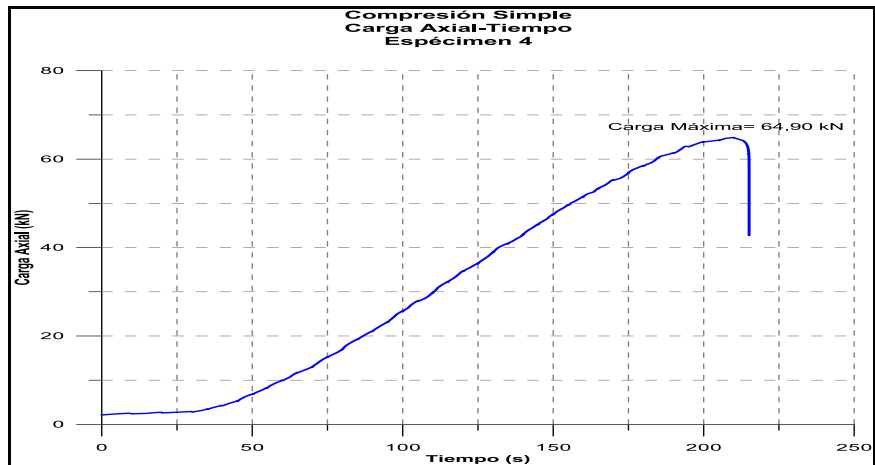


Figura 62 Carga Axial-Tiempo. Especimen 4, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

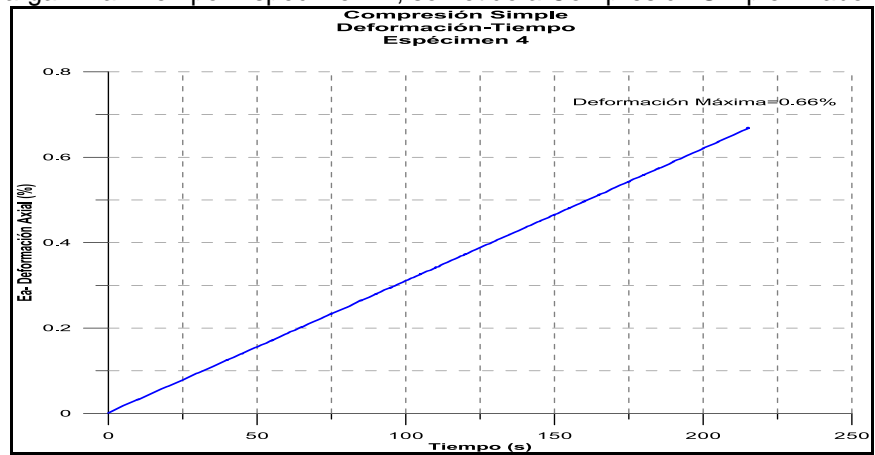


Figura 63 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 4, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

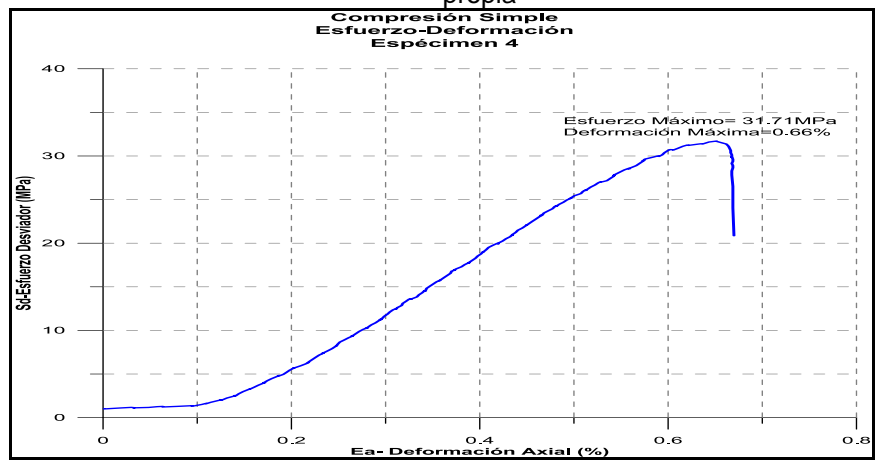


Figura 64 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 4, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 5

Tabla 42 Compresión simple. Datos del espécimen 5. Elaboración propia

Espécimen 5	
Datos del Espécimen	
Altura	133,9 mm
Diámetro	50 mm
Área	19,64 cm <sup>2</sup>
Volumen	262,91 cm <sup>3</sup>

Tabla 43 Resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple para el espécimen 5.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
556,5		1	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	4993,47	Max	0,65
Min	214,14	Min	0,00
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,88	Max	253,70
Min	0,00	Min	0,00

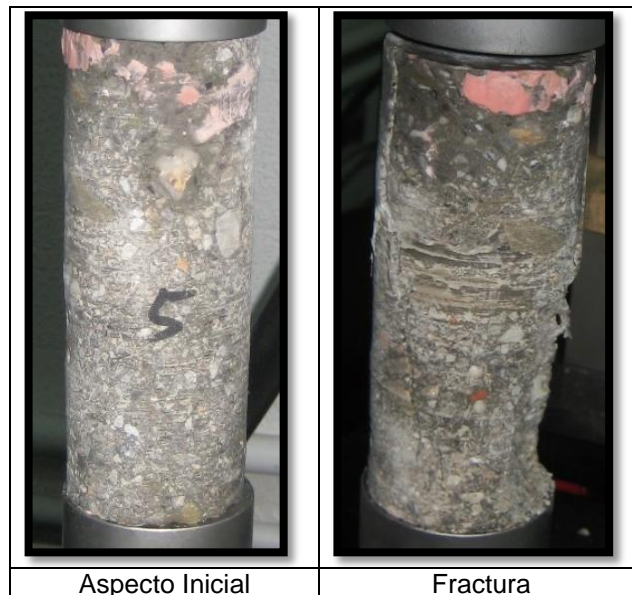


Figura 65 Ensayo de Compresión Simple. Espécimen 5. Elaboración propia.

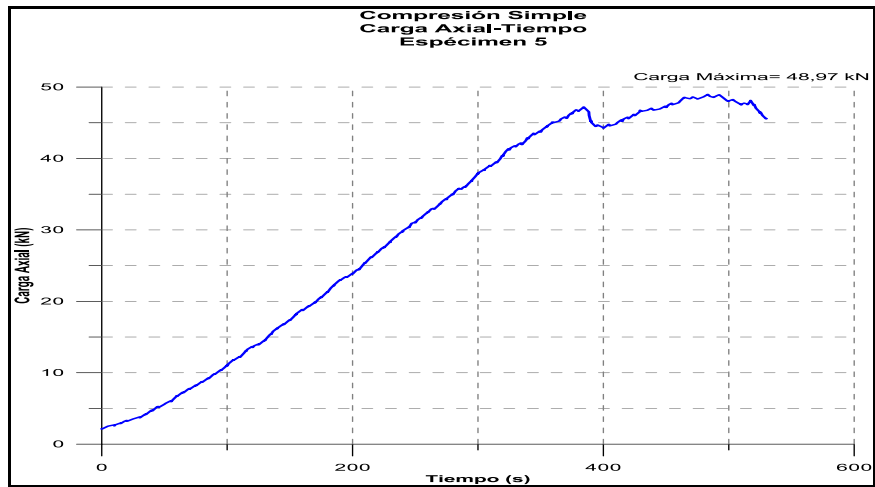


Figura 66 Carga Axial-Tiempo. Especimen 5, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

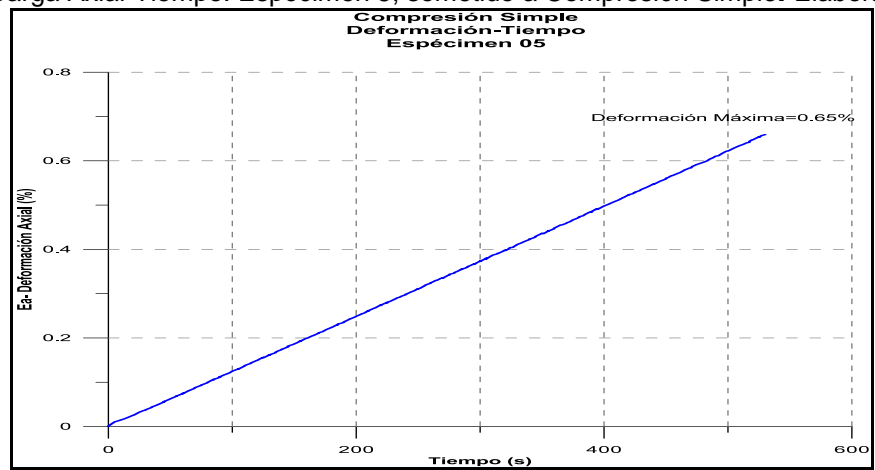


Figura 67 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 5, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

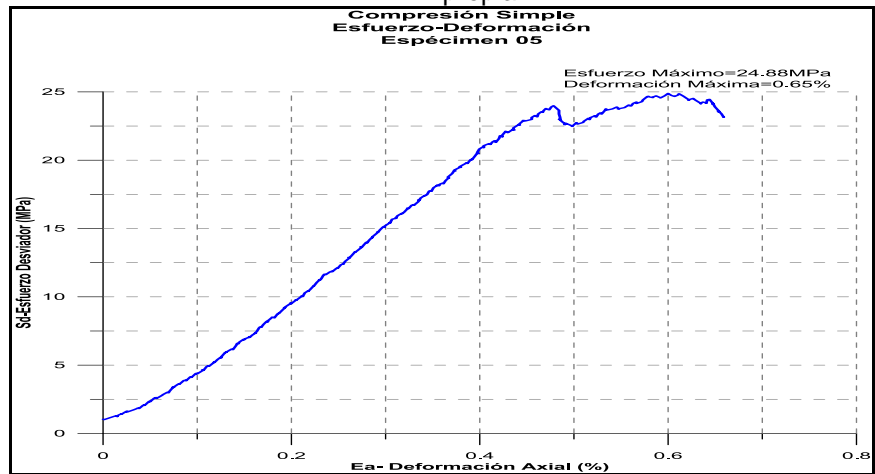


Figura 68 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 5, sometido a Compresión Simple. Elaboración propia

#### IV.5.1.1 Resumen del Ensayo a Compresión Simple

Tabla 44 Resumen de resultados del ensayo a Compresión simple controlado. Elaboración propia

Compresión Simple	
Espécimen	Esfuerzo máximo (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	353,94
2	371,07
3	299,90
4	323,35
5	253,70

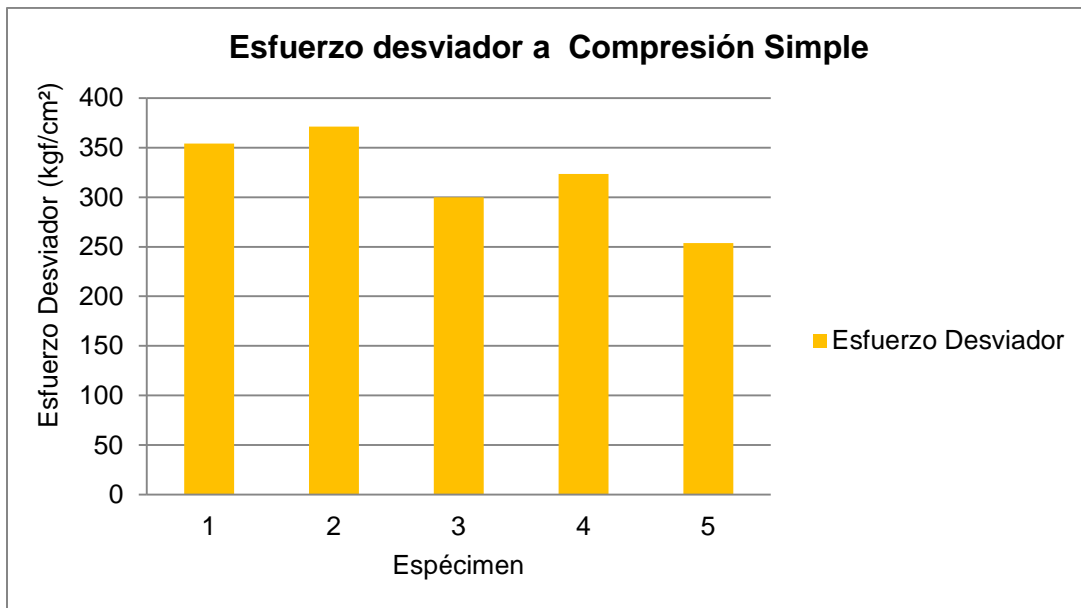


Figura 69 Esfuerzo desviador de cada espécimen ensayado a compresión simple. Elaboración propia

Con base en los ensayos se establece un valor promedio de resistencia de los núcleos de microconcreto de 320 kg/cm<sup>2</sup> con una desviación estándar de 46 kg/cm<sup>2</sup>. Asumiendo que este valor promedio corresponde al 85% del valor de los cilindros normativos (porrero), el valor probable de resistencia es de 376 kg/cm<sup>2</sup>, éste valor es el que sirve de indicativo de valor real de resistencia, pero para la comparación se utilizará el valor promedio del núcleo.

#### **IV.5.2 Ensayo de Compresión Cíclica**

Se estableció una serie de ensayos cíclicos para ver el comportamiento de las muestras de microconcreto sometidos a cargas dinámicas de bajo ciclaje, se pretende establecer la estabilidad de los ciclos histeréticos, conservación del módulo de elasticidad, comportamiento de las deformaciones y esfuerzos máximos posibles.

Las tres primeras muestras se ensayaron con carga axial creciente hasta la falla de la muestra se estimaron cuatro escalones y llevar después de esto a la falla de la muestra, la primera muestra ( muestra 6) corresponde a un ensayo que fallo en el cuarto escalón debido a que fue ensayada previamente y se esforzó a un nivel de 85% de carga y el sistema se descargó, se procedió a ensayarla para verificar que cuando llegamos a niveles cercanos de plastificación las muestras se perturban y tienden a fallar mas tempranamente. Las muestras 6A y 7 se realizaron según lo planificado y permiten ver la evolución de esfuerzos de forma creciente con deformaciones consistentes en el rango elástico, con permanencia estable del módulo de elasticidad, no se observa degradación en los ciclos de carga y descarga.

El comportamiento de las muestras evaluadas en la condición mencionada anteriormente permite establecer que el material propuesto se comporta elásticamente en carga cíclica de bajo ciclaje por encima de 250 kg/cm<sup>2</sup>, esto implica que puede resistir cargas considerables de forma eventual y ser descargada sin comprometer la seguridad del material.

## ESPÉCIMEN 6

Tabla 45 Compresión cíclica. Datos del espécimen 6. Elaboración propia

Espécimen 6	
Datos del Espécimen	
Altura	131,9 mm
Diámetro	50 mm
Área	19,64 cm <sup>2</sup>
Volumen	258,99 cm <sup>3</sup>

Tabla 46 Resultados obtenidos en el ensayo de compresión Cíclica para el espécimen 6.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
2391,6		9	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	4076,76	Max	0,33
Min	0,03	Min	0,00
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,44	Max	207,00
Min	0,00	Min	10,40



Figura 70 Ensayo de Compresión Cíclica. Espécimen 6. Elaboración propia



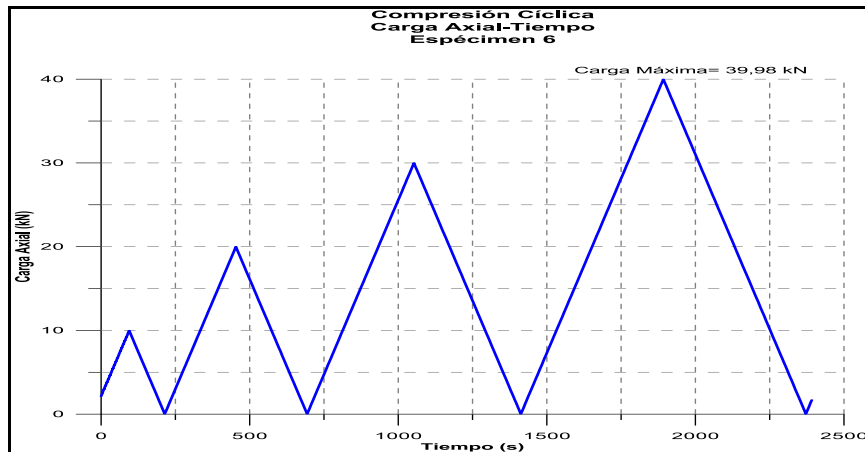


Figura 71 Carga Axial-Tiempo. Especimen 6, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

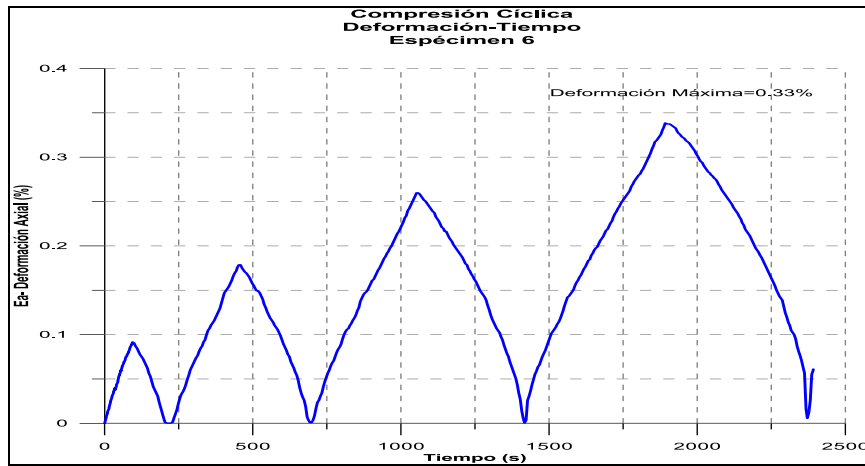


Figura 72 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 6, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

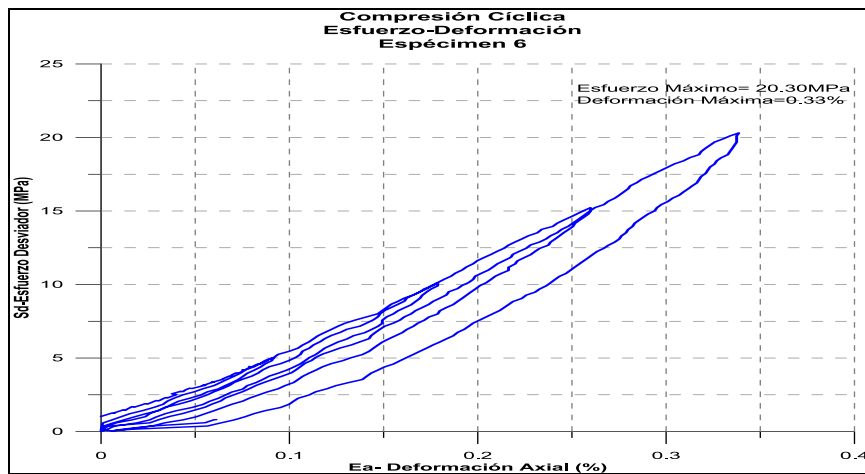


Figura 73 Desviador-Deformación Axial. Especimen 6, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 6A

Tabla 47 Compresión cíclica. Datos del espécimen 6A. Elaboración propia

Espécimen 6 A	
Datos del Espécimen	
Altura	131,9 mm
Diámetro	50 mm
Área	19,64 cm <sup>2</sup>
Volumen	258,99 cm <sup>3</sup>

Tabla 48 Resultados obtenidos en el ensayo de compresión Cíclica para el espécimen 6A.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
3082,9		9	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	6065,18	Max	0,53
Min	0,00	Min	0,00
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	5,15	Max	308,36
Min	0,00	Min	0,00

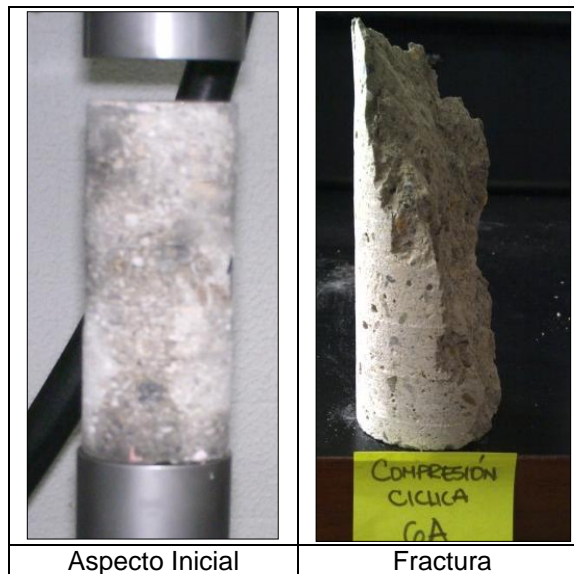


Figura 74 Ensayo de Compresión Cíclica. Espécimen 6A. Elaboración propia

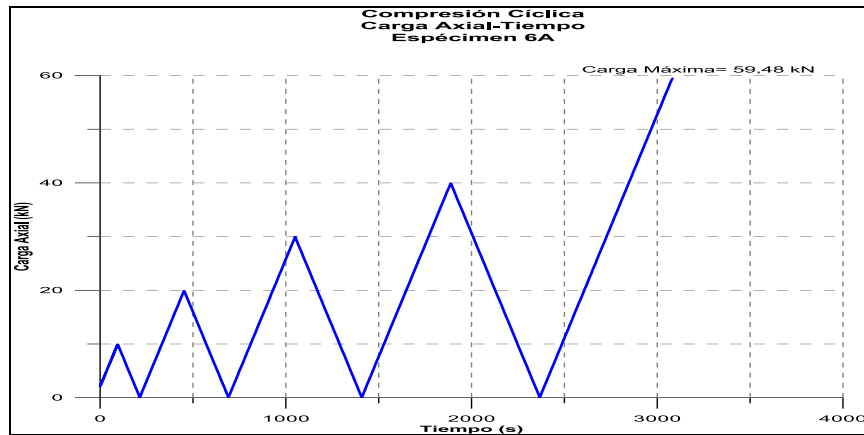


Figura 75 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 6A, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

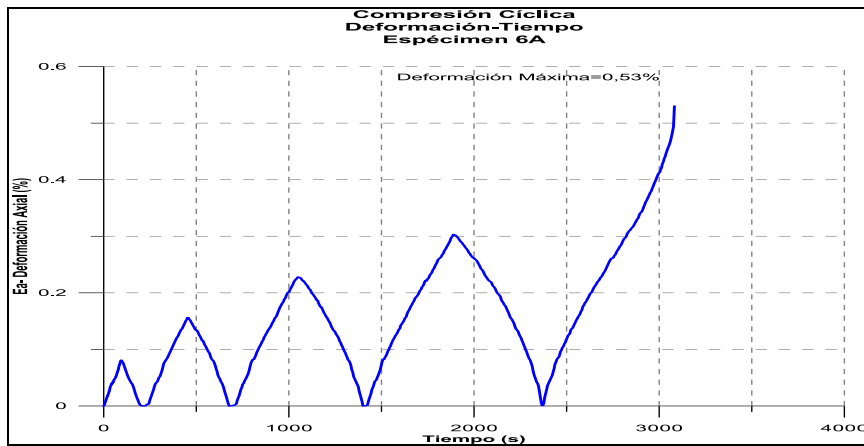


Figura 76 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 6A, sometido a Compresión Cíclica  
Elaboración propia

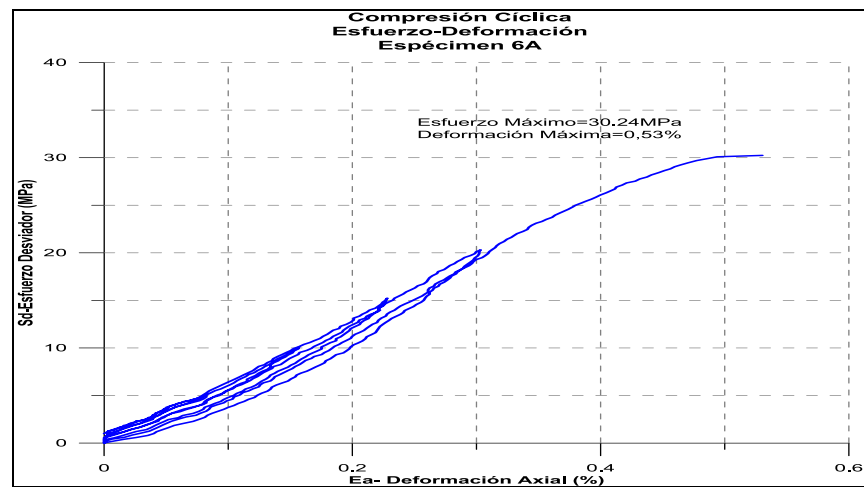


Figura 77 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 6A, sometido a Compresión Cíclica  
Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 7

Tabla 49 Compresión cíclica. Datos del espécimen 7. Elaboración propia

Espécimen 7	
Datos del Espécimen	
Altura	131,95 mm
Diámetro	51 mm
Área	20,43 cm <sup>2</sup>
Volumen	269,55 cm <sup>3</sup>

Tabla 50 Resultados obtenidos en el ensayo de compresión Cíclica para el espécimen 7.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
723,6		9	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	5985,64	Max	0,43
Min	220,26	Min	0,00
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	2,66	Max	292,55
Min	0,00	Min	9,38

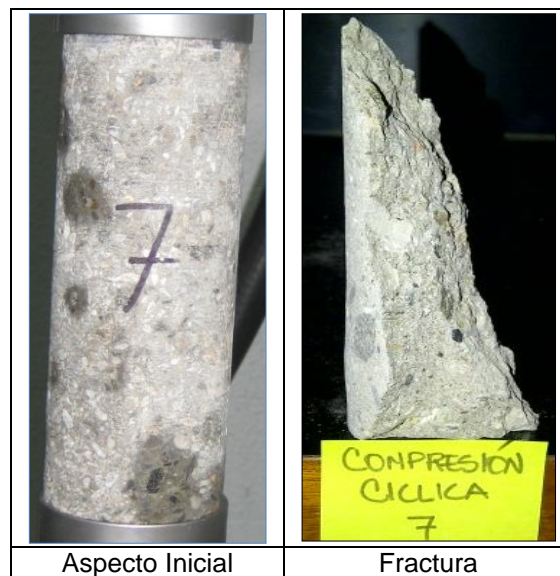


Figura 78 Ensayo de Compresión Cíclica. Espécimen 7  
Elaboración propia

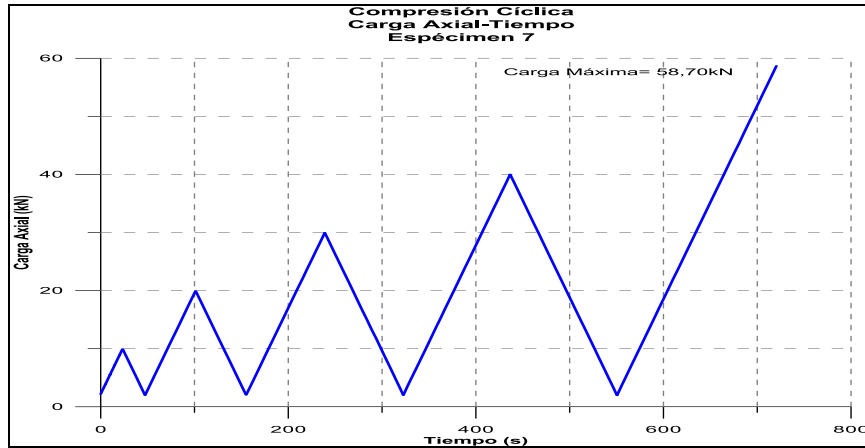


Figura 79 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 7, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

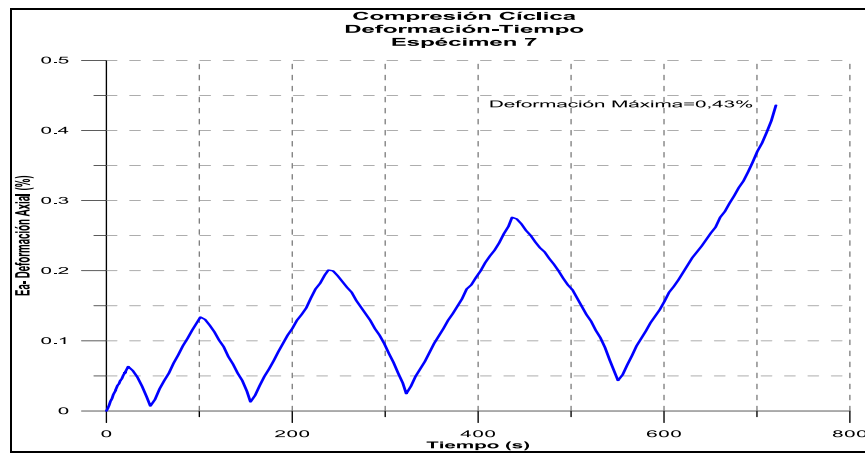


Figura 80 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 7, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

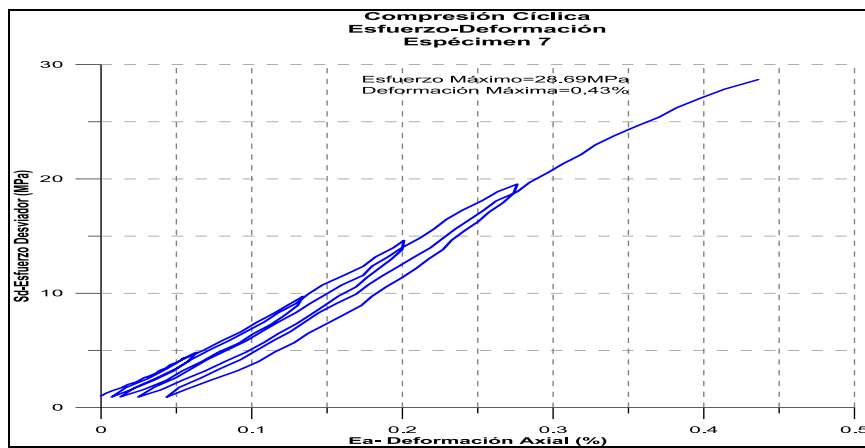


Figura 81 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 7, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 8

Tabla 51 Compresión cíclica. Datos del espécimen 8. Elaboración propia

Espécimen 8	
Datos del Espécimen	
Altura	134,15 mm
Diámetro	51,50 mm
Área	20,83 cm <sup>2</sup>
Volumen	279,44 cm <sup>3</sup>

Tabla 52 Resultados obtenidos en el ensayo de compresión Cíclica para el espécimen 8.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
10409,3		91	
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	5734,79	Max	0,53
Min	219,24	Min	0,02
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	2,16	Max	274,71
Min	0,03	Min	9,18

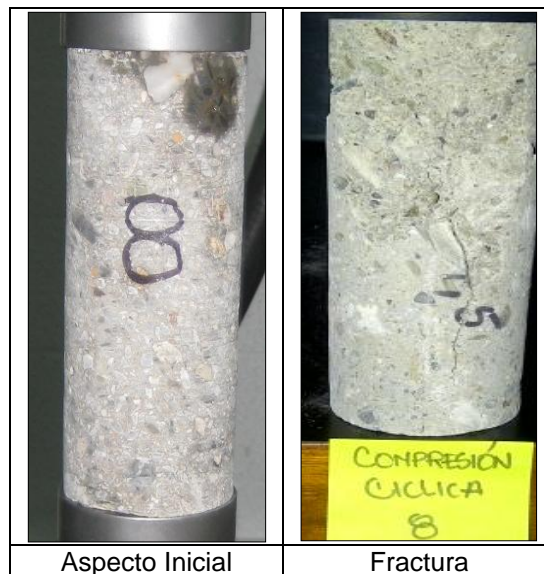


Figura 82 Ensayo de Compresión Cíclica. Espécimen 8  
Elaboración propia

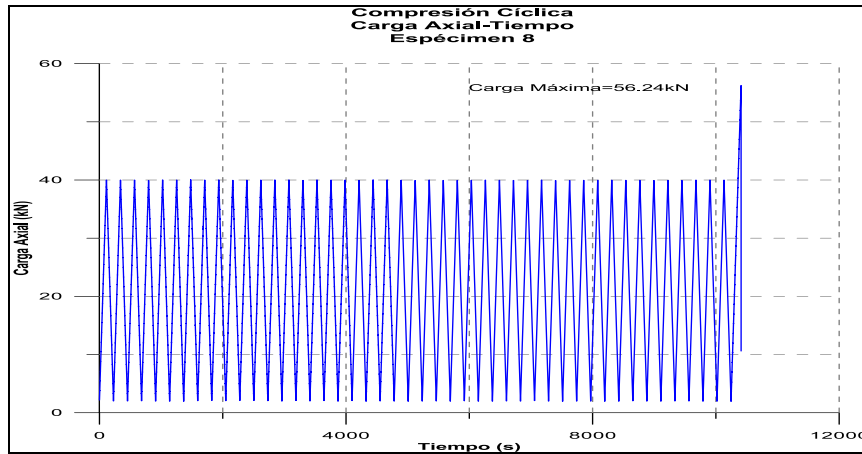


Figura 83 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 8, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

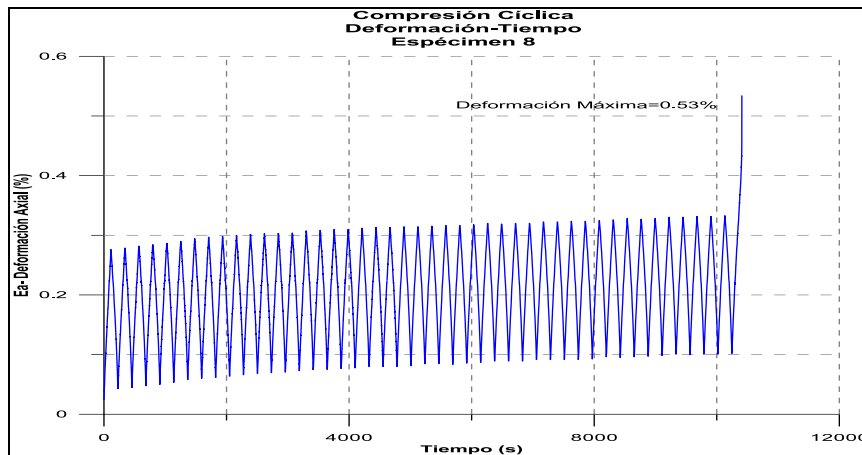


Figura 84 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 8, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

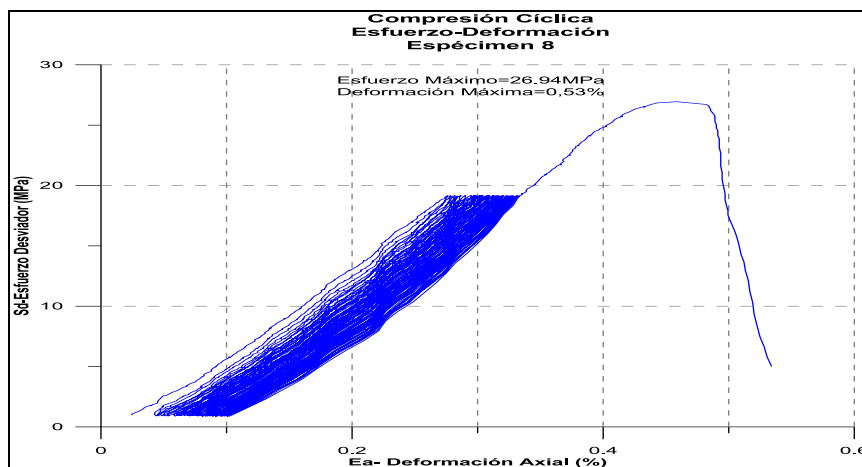


Figura 85 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 7, sometido a Compresión Cíclica. Elaboración propia

El ensayo en el espécimen 8 corresponde a carga cíclica de 45 ciclos completos y después el ensayo hasta la falla, se observa en el resultado que la muestra se mantiene en rango elástico en todos los ciclos experimentados y con una deformación acumulada pequeña. Con base en los resultados se puede establecer que el material es estable completamente cuando trabaja en rango elástico hasta aproximadamente 2/3 de su carga máxima.

**IV.5.2.1 Resumen del Ensayo a Compresión Cíclica**

Tabla 53 Resumen de resultados del ensayo a Compresión Cíclica. : Elaboración propia

Compresión Cíclica	
Espécimen	Esfuerzo máximo (kgf/cm <sup>2</sup> )
6	207,00
6A	308,36
7	292,55
8	274,71

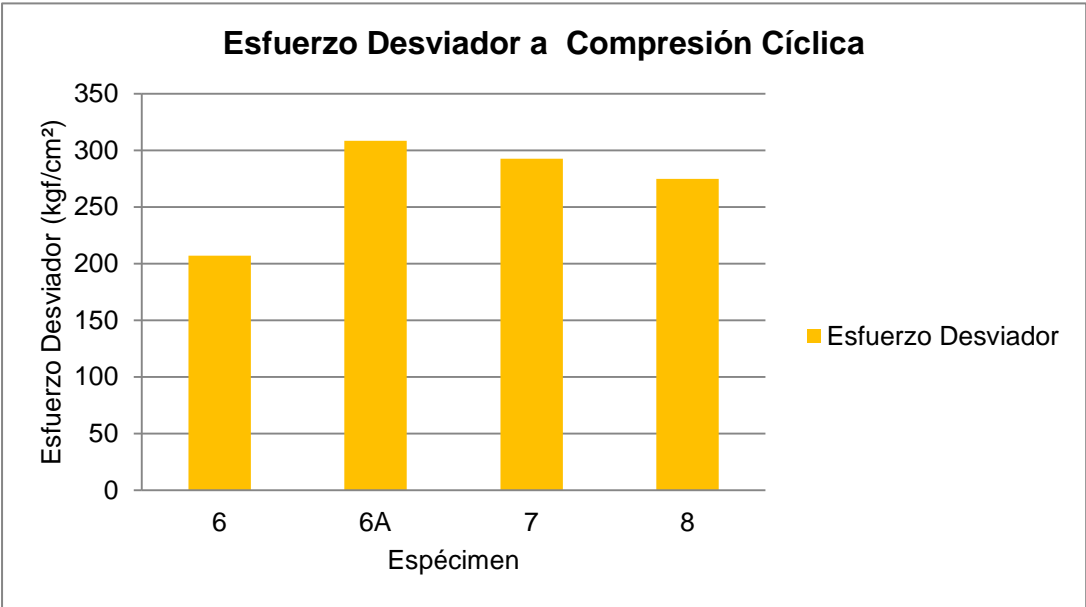


Figura 86 Esfuerzo desviador de cada espécimen ensayado a compresión cíclica. Elaboración propia

El resumen muestra que para las muestras 6A, 7 y 8 los valores esperados de respuestas máximas están dentro del rango de esfuerzos establecidos



### **IV.5.3 Ensayo de Tracción Indirecta**

Se presentan a continuación los ensayos sobre 6 muestras sometidas a tracción indirecta, tomando como criterio el ensayo de rocas debido a que el tamaño máximo del material lo permite.

Para este criterio se estableció que los resultados permitirían estimar los valores referenciales de comportamiento del concreto como parte integral de los modelos de material utilizados para el cálculo y chequeo de obras subterráneas.

Los resultados permitirán establecer la capacidad a tracción que es un requerimiento del material de inyección para que se integre con el medio circundante, los valores sugeridos indican que el esfuerzo debe estar por encima de los 20 kg/cm<sup>2</sup>.

## ESPÉCIMEN 1

Tabla 54 Ensayo de tracción indirecta. Datos del espécimen 1. Elaboración propia

Espécimen 1	
Datos del Espécimen	
Altura	31,00 mm
Diámetro	50,94 mm
Área	20,38 cm <sup>2</sup>
Volumen	63,18cm <sup>3</sup>

Tabla 55 Resultados obtenidos en el ensayo de Tracción indirecta para el espécimen 1. Elaboración propia.

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
101,4		1	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	854,92	Max	1,01
Min	33,27	Min	0,00
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,85	Max	34,47
Min	0,00	Min	3,33

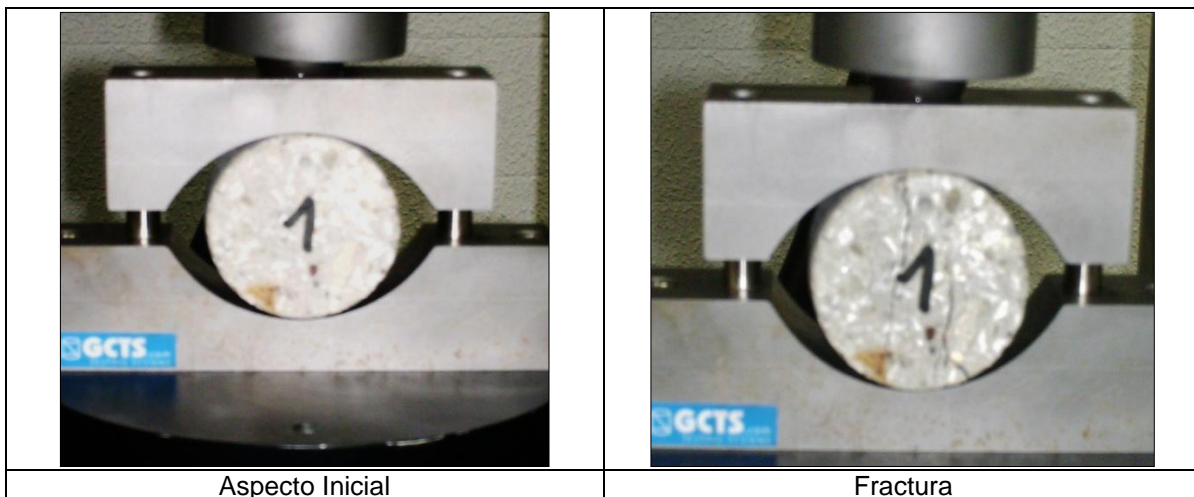


Figura 87 Ensayo de Tracción indirecta. Espécimen 1. Elaboración propia

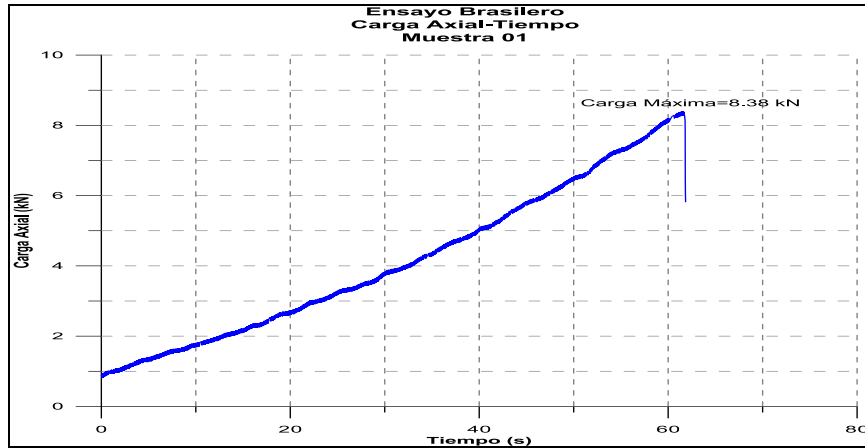


Figura 88 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 1, sometido a Tracción Indirecta. Elaboración propia

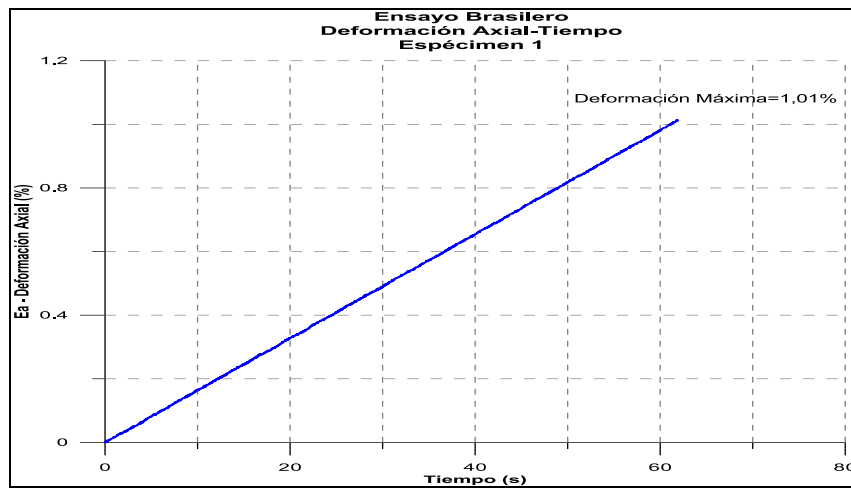


Figura 89 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 1, sometido a tracción Indirecta. Elaboración propia

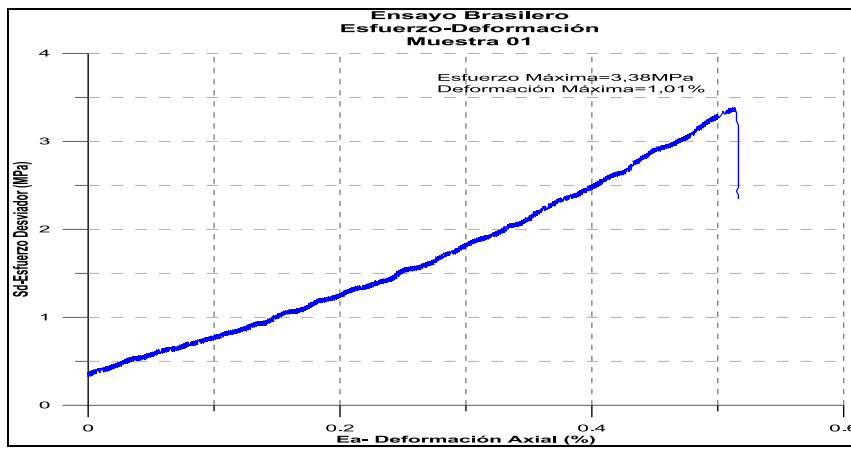


Figura 90 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 1, sometido a Tracción indirecta. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 2

Tabla 56 Ensayo de tracción indirecta. Datos del espécimen 2. Elaboración propia

Espécimen 2	
Datos del Espécimen	
Altura	30,50 mm
Diámetro	51,20 mm
Área	20,59 cm <sup>2</sup>
Volumen	62,59 cm <sup>3</sup>

Tabla 57 Resultados obtenidos en el ensayo de Tracción indirecta para el espécimen 2. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
48,9		1	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	735,01	Max	0,66
Min	80,98	Min	0
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,41	Max	29,96
Min	0	Min	3,30

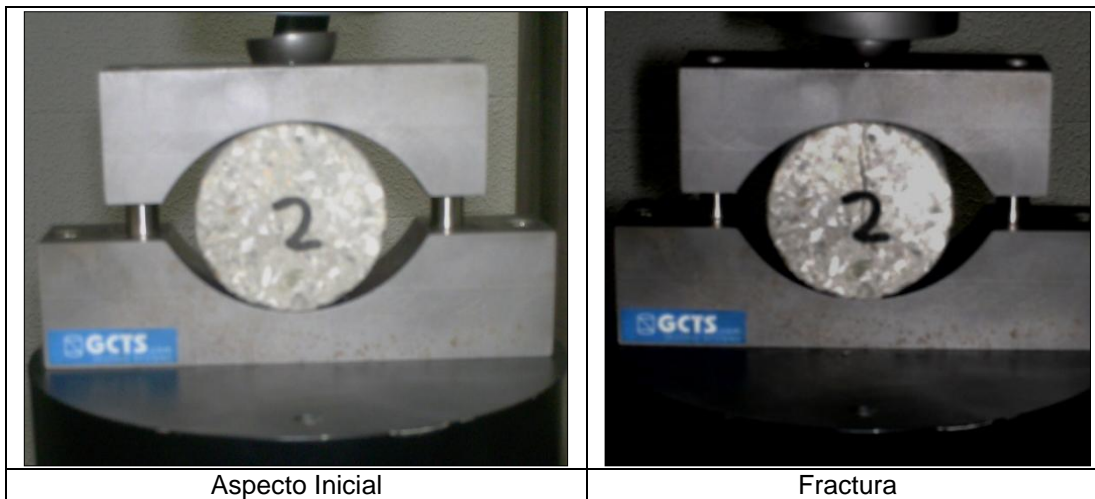


Figura 91 Ensayo de Tracción indirecta. Espécimen 2.

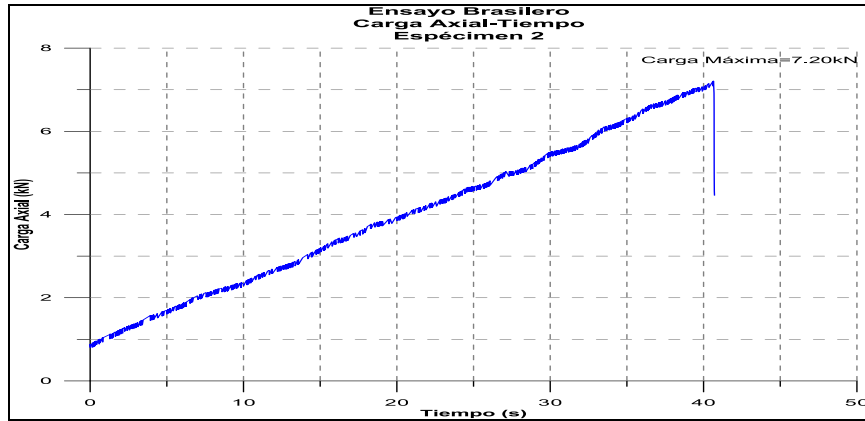


Figura 92 Ensayo de Tracción indirecta. Espécimen 2. Elaboración propia

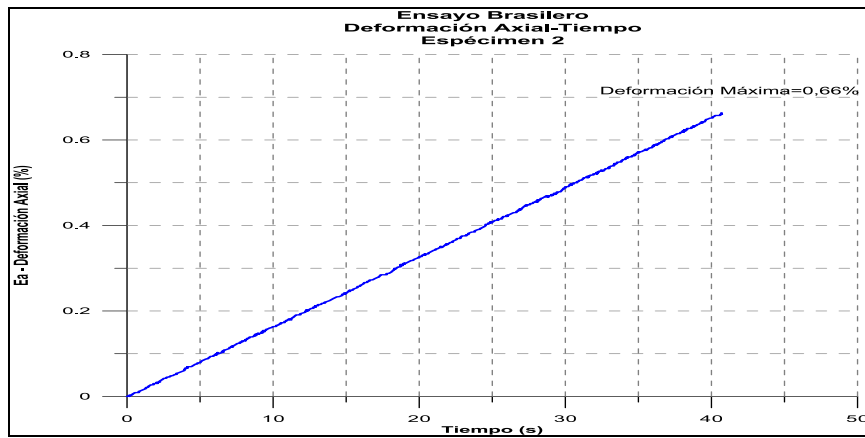


Figura 93 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 2, sometido a tracción Indirecta. Elaboración propia

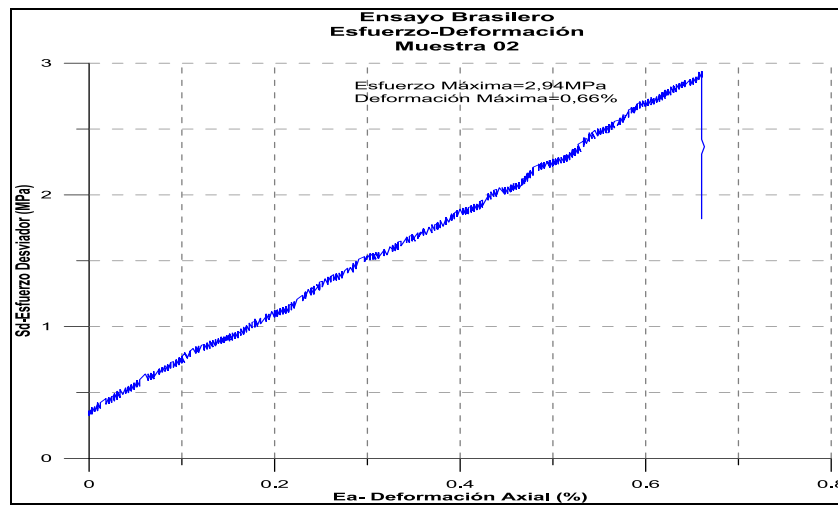


Figura 94 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 2, sometido a Tracción indirecta. Elaboración propia

### ESPÉCIMEN 3

Tabla 58 Ensayo de tracción indirecta. Datos del espécimen 3. Elaboración propia

Espécimen 3	
Datos del Espécimen	
Altura	30,50 mm
Diámetro	51,20 mm
Área	20,51 cm <sup>2</sup>
Volumen	62,76 cm <sup>3</sup>

Tabla 59 Resultados obtenidos en el ensayo de Tracción indirecta para el espécimen 3. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
50,8		1	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	815,99	Max	0,71
Min	88,76	Min	0
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,36	Max	33,22
Min	0	Min	3,61

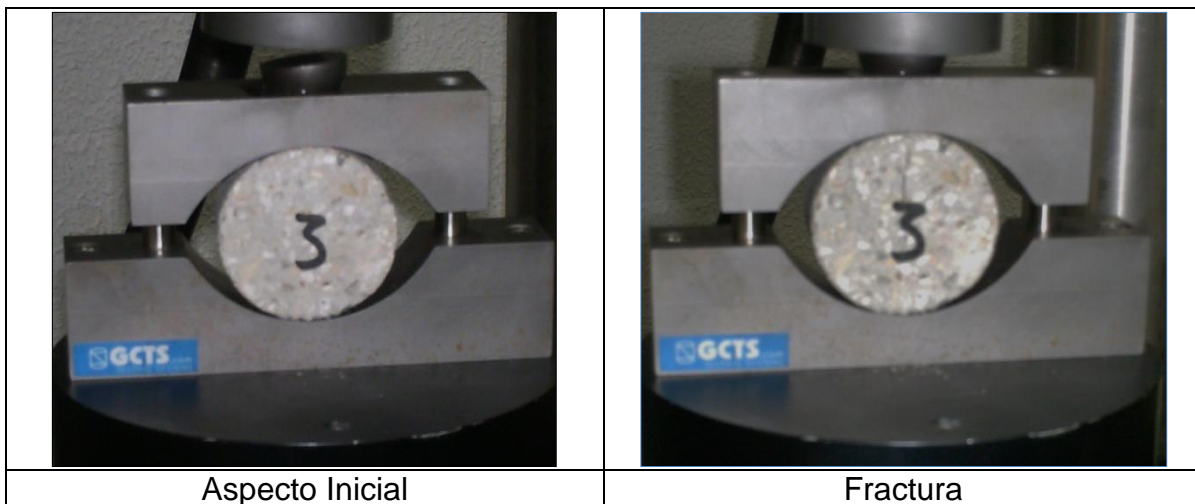


Figura 95 Ensayo de Tracción indirecta. Espécimen 3. Elaboración propia

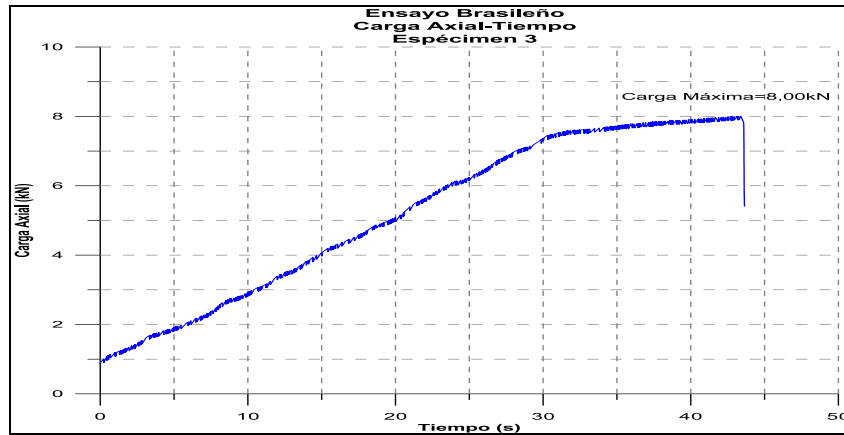


Figura 96 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 3, sometido a Tracción Indirecta. Elaboración propia

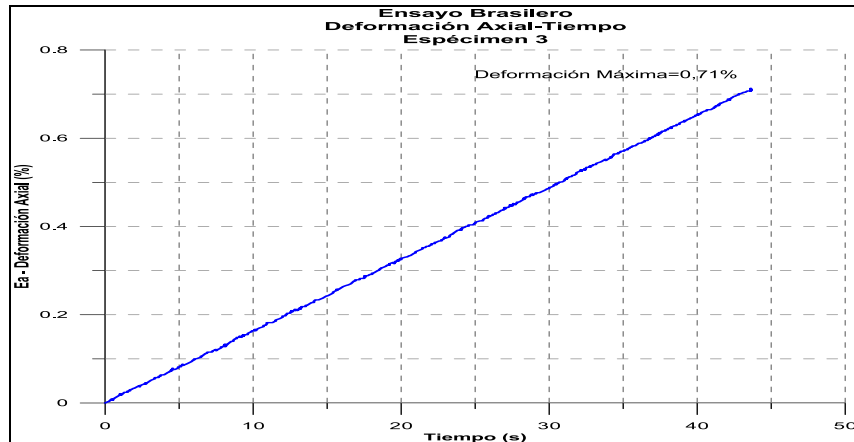


Figura 97 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 3, sometido a tracción Indirecta. Elaboración propia

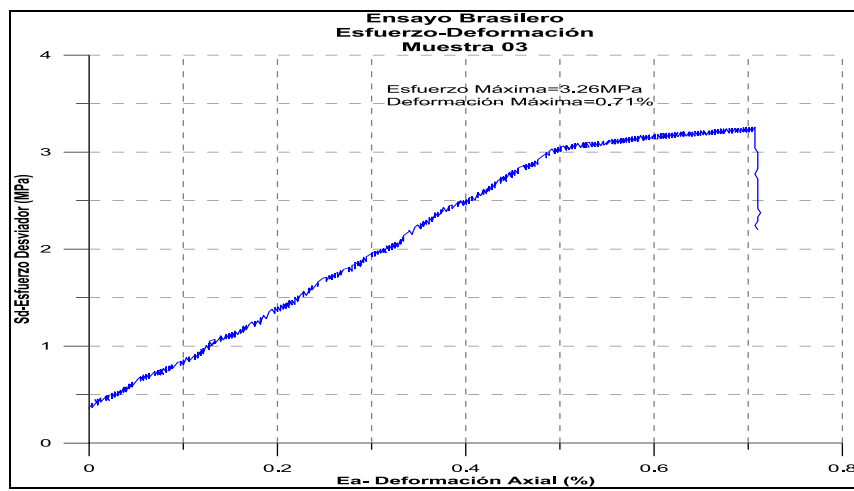


Figura 98 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 3, sometido a Tracción indirecta. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 4

Tabla 60 Datos del espécimen 4. Elaboración propia

Espécimen 4	
Datos de la muestra	
Altura	28,82mm
Diámetro	51,20 mm
Área	20,59cm <sup>2</sup>
Volumen	59,34cm <sup>3</sup>

Tabla 61 Resultados obtenidos en el ensayo de Tracción indirecta para el espécimen 4.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
48,3		1	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	777,01	Max	0,77
Min	54,50	Min	0,03
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,39	Max	33,53
Min	0,01	Min	2,35

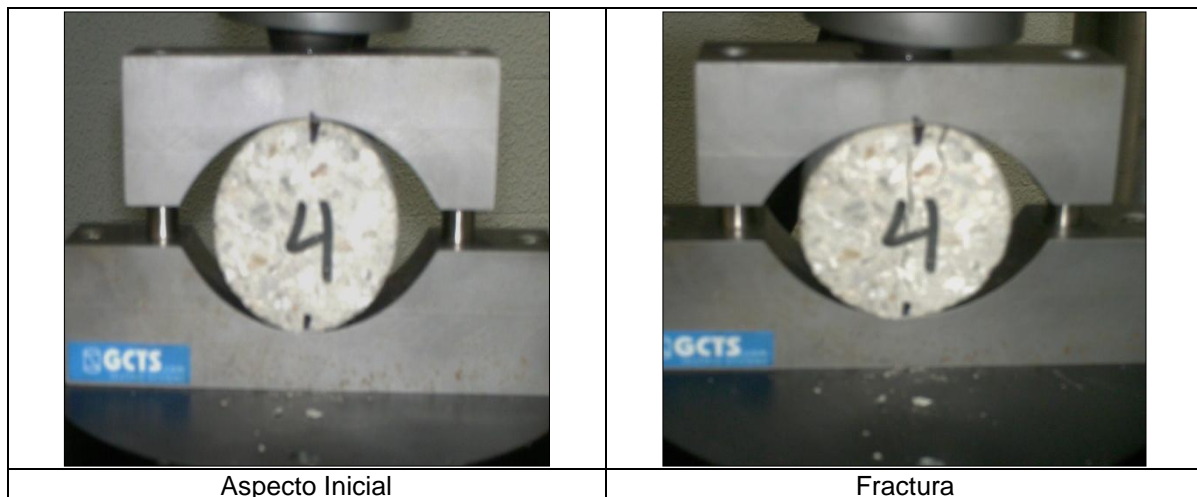


Figura 99 Ensayo de Tracción indirecta. Espécimen 4. Elaboración propia



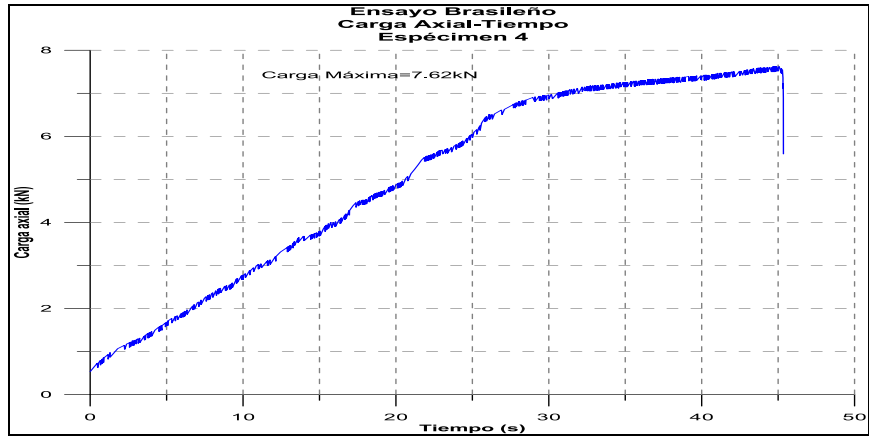


Figura 100 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 4, sometido a Tracción Indirecta. Elaboración propia

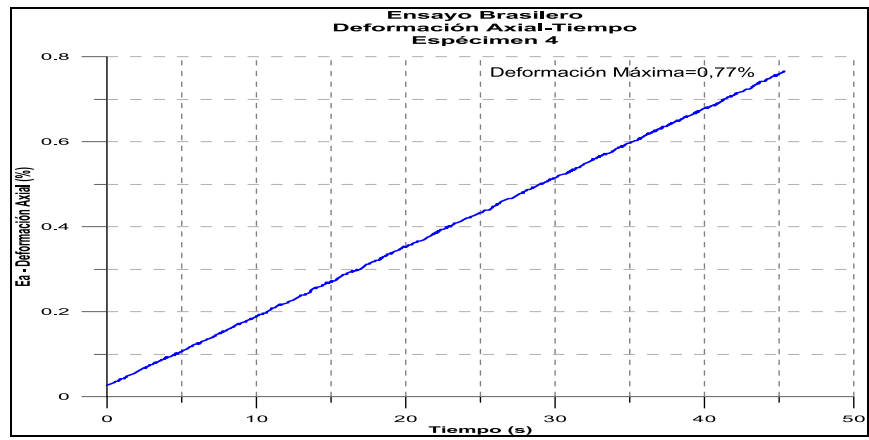


Figura 101 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 4, sometido a tracción Indirecta. Elaboración propia

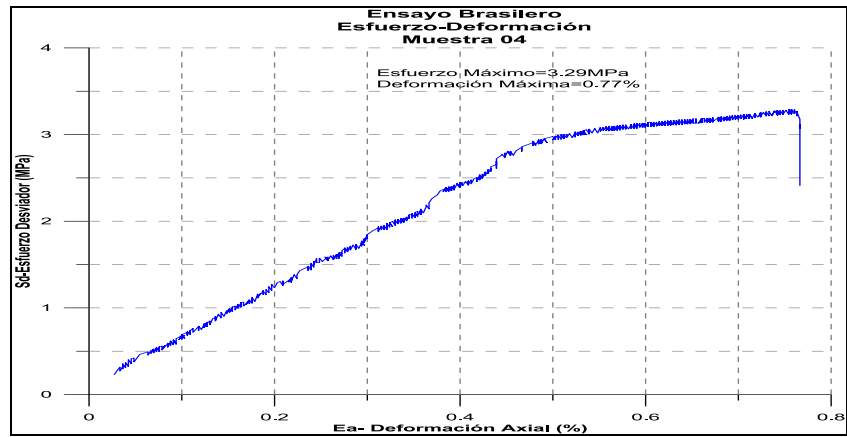


Figura 102 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 4, sometido a tracción Indirecta. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 5

Tabla 62 Ensayo de Tracción indirecta. Datos del espécimen 5. Elaboración propia

Espécimen 5	
Datos del Espécimen	
Altura	24,38 mm
Diámetro	51,20 mm
Área	20,59 cm <sup>2</sup>
Volumen	50,20 cm <sup>3</sup>

Tabla 63 Resultados obtenidos en el ensayo de Tracción indirecta para el espécimen 5.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
22,8		1	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	537,24	Max	0,17
Min	249,16	Min	0
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,19	Max	27,43
Min	0	Min	12,71

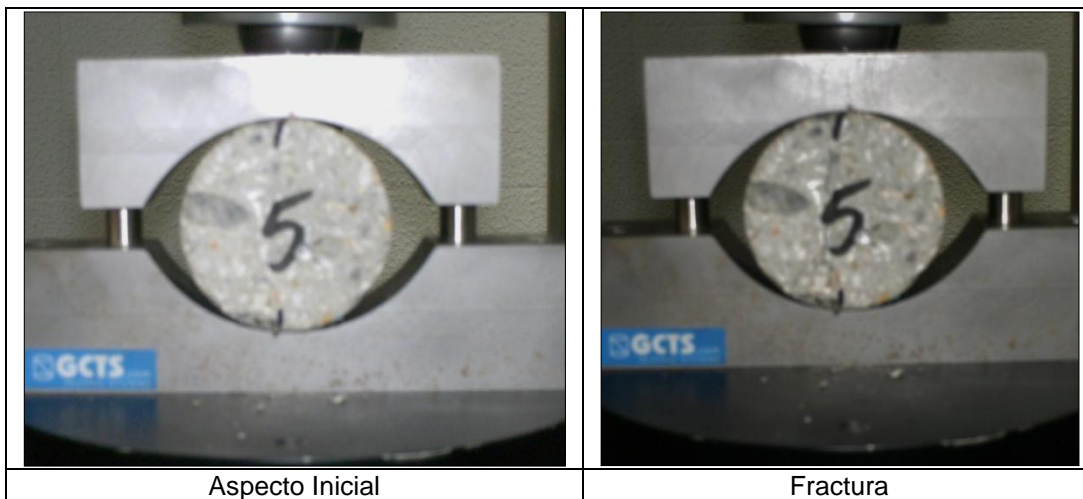


Figura 103 Ensayo de Tracción indirecta. Espécimen 5. Elaboración propia

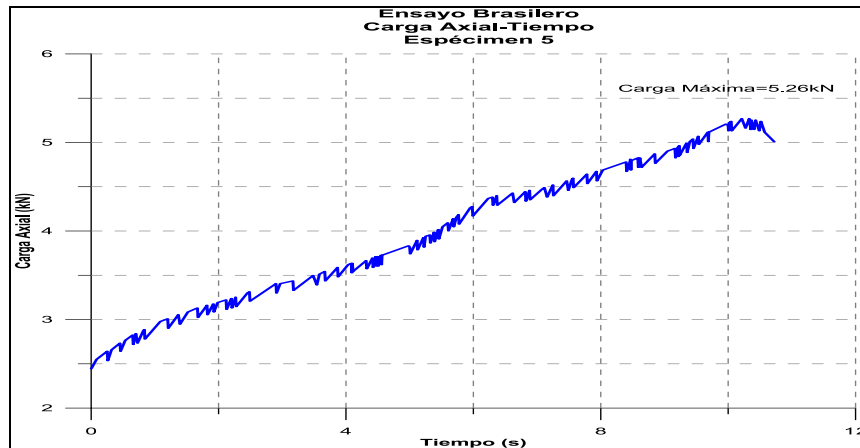


Figura 104 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 5, sometido a Tracción Indirecta. Elaboración propia

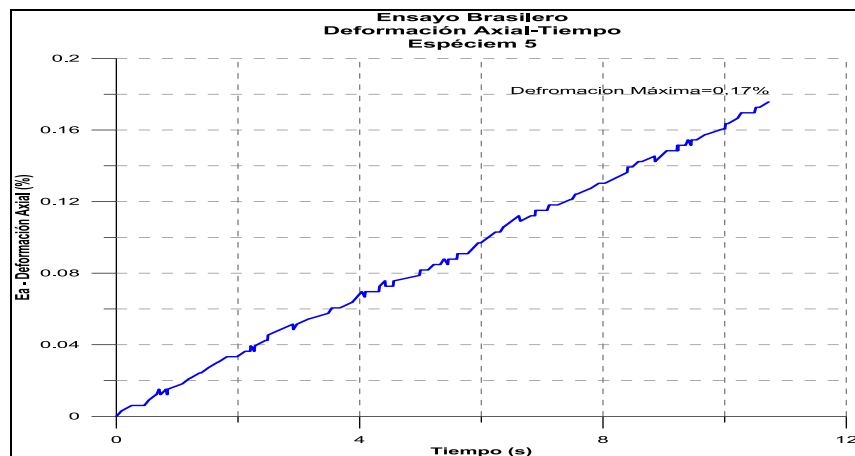


Figura 105 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 5, sometido a tracción Indirecta. Elaboración propia

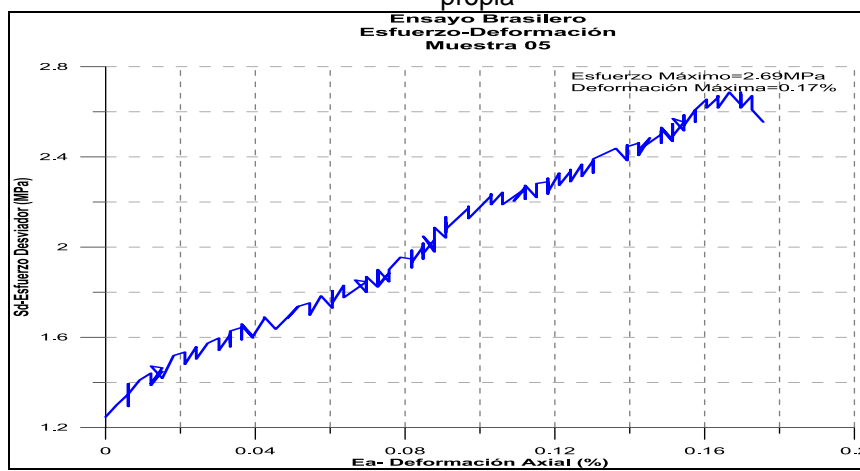


Figura 106 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 5, sometido a Tracción Indirecta. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 6

Tabla 64 Ensayo de tracción indirecta. Datos del espécimen 6. Elaboración propia

Espécimen 6	
Datos de la muestra	
Altura	21,60 mm
Diámetro	50,90 mm
Área	20,35 cm <sup>2</sup>
Volumen	43,95 cm <sup>3</sup>

Tabla 65 Resultados obtenidos en el ensayo de Tracción indirecta para el espécimen 6.  
Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Fases	
19,4		1	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	496,59	Max	0,22
Min	98,91	Min	0
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,16	Max	28,76
Min	0	Min	13,35

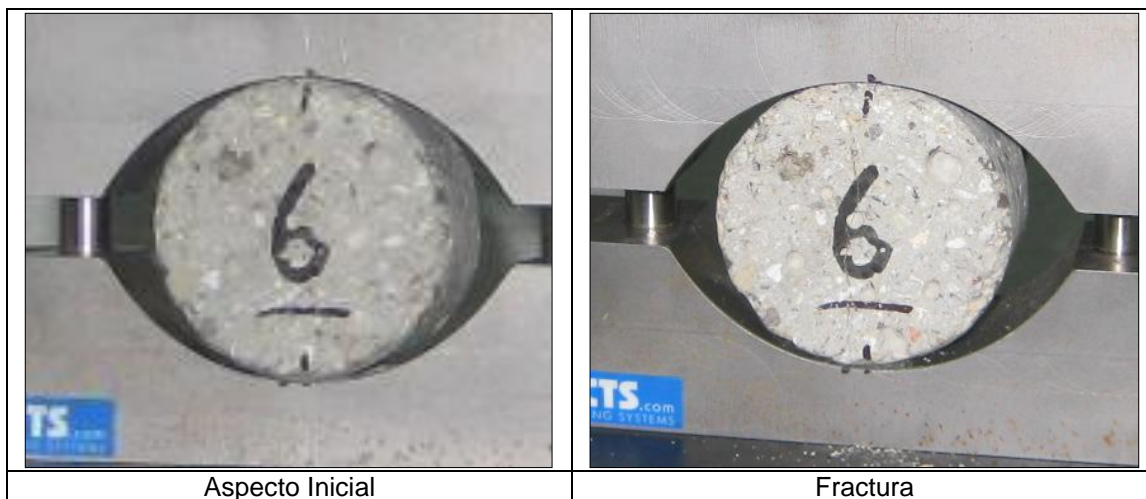


Figura 107 Ensayo de Tracción Indirecta. Espécimen 6. Elaboración propia

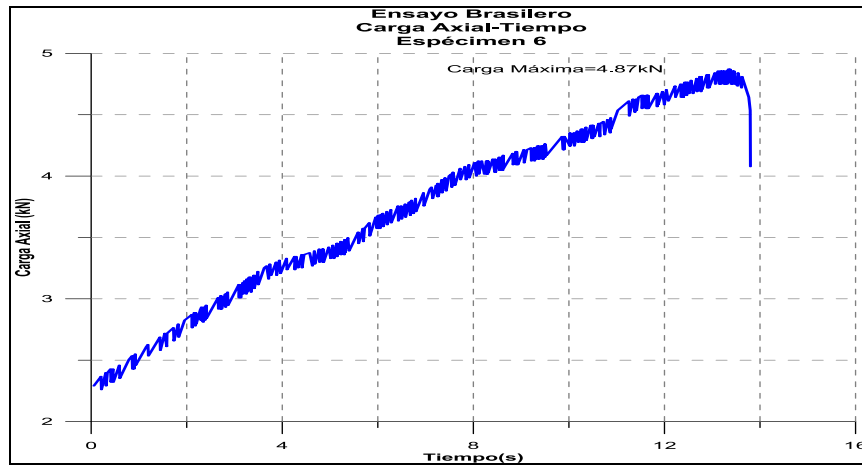


Figura 108 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 6, sometido a Tracción Indirecta. Elaboración propia

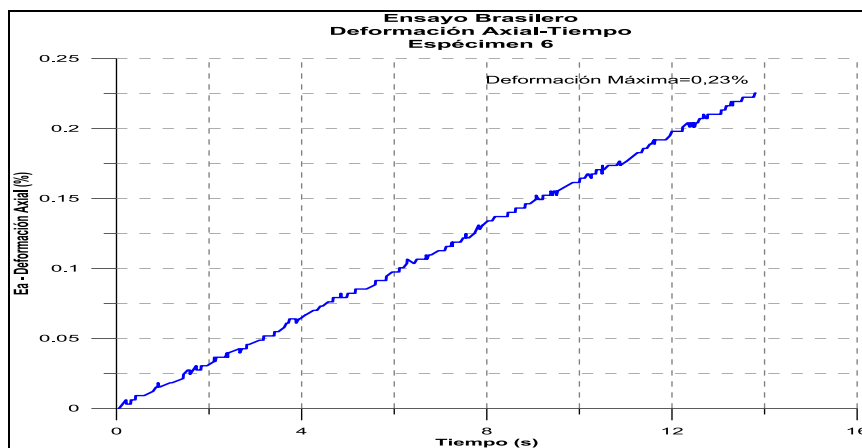


Figura 109 Deformación Axial-Tiempo. Espécimen 6, sometido a tracción Indirecta. Elaboración propia

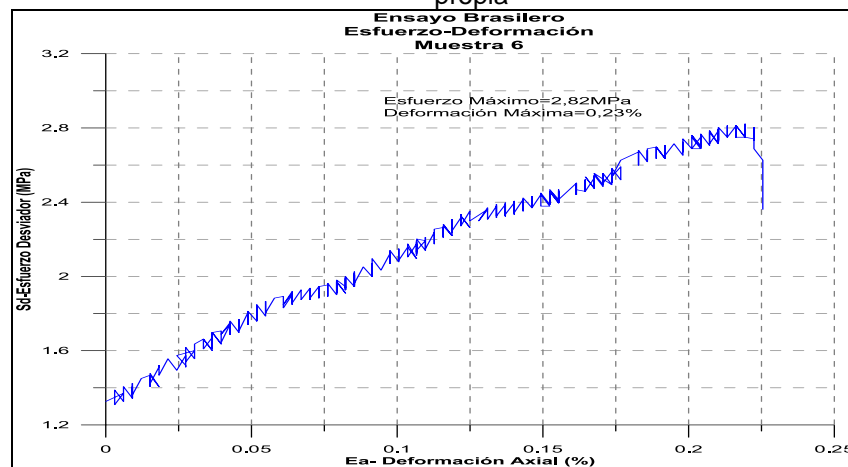


Figura 110 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 6, sometido a Tracción Indirecta. Elaboración propia

#### IV.5.3.1 Resumen del Ensayo a Tracción Indirecta

Tabla 66 Ensayo de tracción indirecta. Resumen de resultados. Elaboración propia

Espécimen	Esfuerzo máx (Kgf/cm <sup>2</sup> )
1	34,47
2	29,96
3	33,22
4	33,53
5	27,43
6	28,76

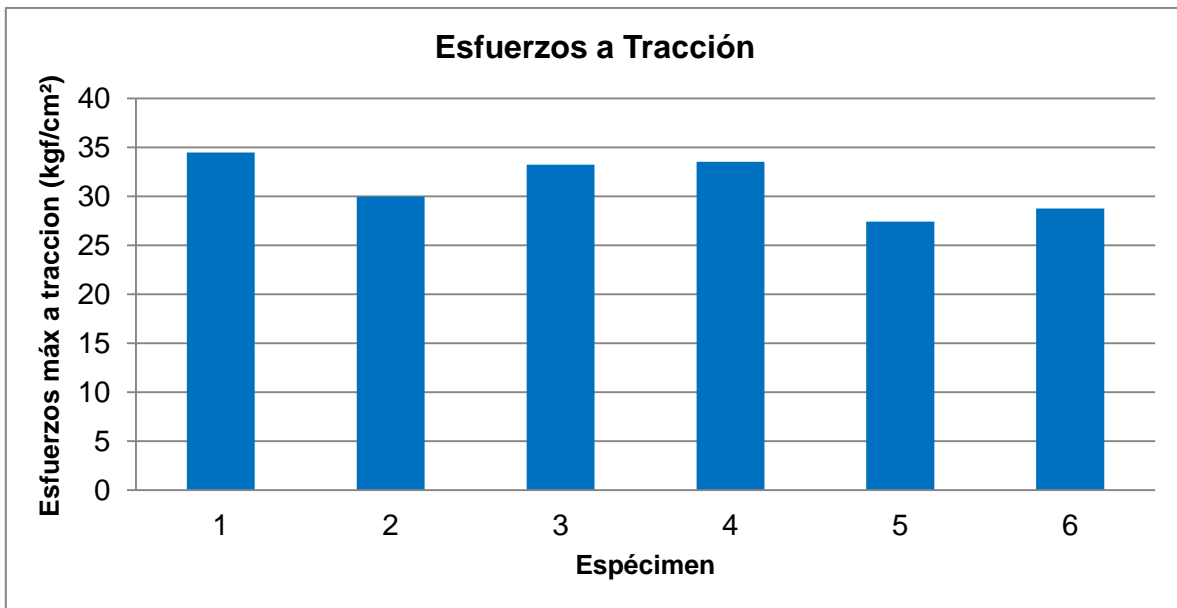


Figura 111 Resistencia máxima alcanzada por cada espécimen sometido a tracción. Elaboración propia

Con base en los resultados obtenidos se observa que todos los valores referenciados son superiores a 20 Kg/cm<sup>2</sup> que es el mínimo considerado y se tiene como resultado un valor promedio de 31 Kg/cm<sup>2</sup> con una desviación estándar de 3 Kg/cm<sup>2</sup>

## IV.6 CRITERIO DE HOEK&BROWN MEDIANTE EL MÉTODO DE LA EQUIVALENCIA DE ÁREAS

Para completar los parámetros requeridos para ver el comportamiento del material propuesto como elemento integral en obras subterráneas se calcula la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Resultados obtenidos mediante la implementación del programa RocLab:

**Hoek-Brown Classification**

sigci: 35 MPa

GSI: 100

mi: 10.1

D: 0

**Hoek-Brown Criterion**

mb: 10.100

s: 1.0000

a: 0.500

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^2$$

**Failure Envelope Range**

Application: Custom

sig3max: 0 MPa

**Mohr-Coulomb Fit**

c: 6.195 MPa

phi: 53.28 deg

**Rock Mass Parameters**

sigt: -3.4653 MPa

sigc: 35.000 MPa

sigcm: 32.437 MPa

Em: 105204.43 MPa

**Rock Mass Data**

Curve-Fitting Method: Simplex

Input Parameters:

sigci: 35 MPa D: 0

Number of Tests: 11

#	sig3 (MPa)	sig1 (MPa)
1	0	34.81
2	0	32.49
3	0	29.5
4	0	31.79
5	0	24.96
6	0	-3.38
7	0	-2.94
8	0	-3.26
9	0	-3.29
10	0	-2.69
11	0	-2.82

Copy Paste Import...

Figura 112 Criterios establecidos para obtener la cohesión y el ángulo de fricción del microconcreto estudiado por el método de la equivalencia de áreas de Hoek&Brown. Elaboración propia

Donde:

$m_i$ : parámetro del material intacto.

GSI: índice de resistencia geológica.

D: factor de perturbación.

$\sigma_{ci}$ : resistencia a la compresión del material no confinado.

$\sigma_{ti}$ : resistencia a tracción

$\sigma_{1c}$ : resistencia compresiva uniaxial

$\sigma_{3c}$ : resistencia compresiva global

$E_m$ : módulo de deformación

C: cohesión

$\phi$ : ángulo de fricción

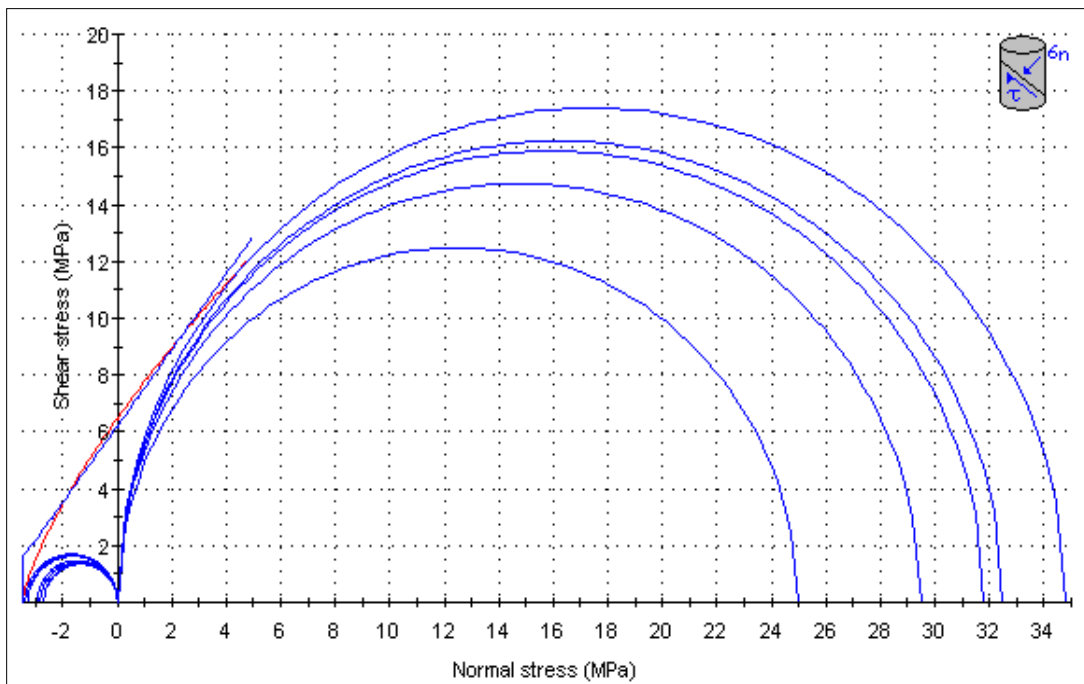


Figura 113 Representación gráfica de linealización del criterio de Hoek&Brown mediante el método de la equivalencia de áreas. Elaboración propia

Con base en el análisis anterior se obtiene que el ángulo de fricción es de 53.2 grados y la cohesión es de 6,2 MPa que equivale a 63 kg/cm<sup>2</sup>.



Los valores establecidos como referenciales corresponden a materiales con un ángulo de fricción mayor a 15 grados y una cohesión superior a los 20 Kg/cm<sup>2</sup>, para establecer un material de características similares a una roca meteorizada. Los valores obtenidos reflejan que se está por encima de los valores recomendados en el material propuesto.

#### **IV.7 ENSAYO LOCATI**

La técnica experimental de caracterización empleada para determinar el comportamiento en fatiga del material es la del método LOCATI, que establece una propuesta de ensayo sobre probeta única. Este método requiere la aplicación de trenes de ondas de carga, de compresión en este caso, de amplitud ( $\Delta P$ ) constante durante un número determinado de ciclos, transcurridos los cuales se incrementa  $\Delta P$  en una cantidad preestablecida conservando el resto de los parámetros. Este suceso se repite hasta que se produzca la rotura o deterioro excesivo del componente en análisis.

En este trabajo se aplicaron bloques de fatiga en escalones de 1000 ciclos de onda triangular con amplitud constante de fuerza. Este tipo de naturaleza de onda fue seleccionado puesto que se determinó para el caso específico que los fenómenos dinámicos sufridos en obras subterráneas en la zona de interfaz de trenes de carga se asocian a impactos cuya simulación se obtiene reproduciendo formas de ondas triangulares.

Los ensayos se realizaron a la temperatura ambiente del laboratorio y a la frecuencia de 5 Hz. La fuerza máxima,  $P_{m\acute{a}x}$ , escogida para el primer escalón de fatiga fue de 20 kN, incrementándose en 3 kN en cada bloque de fatiga hasta alcanzar la rotura. La fuerza mínima del ensayo,  $P_{m\acute{i}n}$ , se mantuvo constante e igual a 6 kN.

Se ensayaron muestras a 3, 7, 14 y 28 días de vaciadas para ver el comportamiento en fatiga en las fases de endurecimiento y crecimiento de resistencia.

#### IV.7.1 Espécimen ensayado a los 3 días de curado

##### ESPÉCIMEN 10

Tabla 67 Datos del espécimen 10. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

Espécimen 10	
Datos del Espécimen	
Altura	133,10 mm
Diámetro	51,10 mm
Área	20,51 cm <sup>2</sup>
Volumen	272,97 cm <sup>3</sup>

Tabla 68 Resultados Obtenidos, espécimen 10. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Duración (ciclos)	
801,6		3402	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	3652,57	Max	0,7
Min	211,08	Min	0,02
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,93	Max	178,25
Min	0,02	Min	10,40

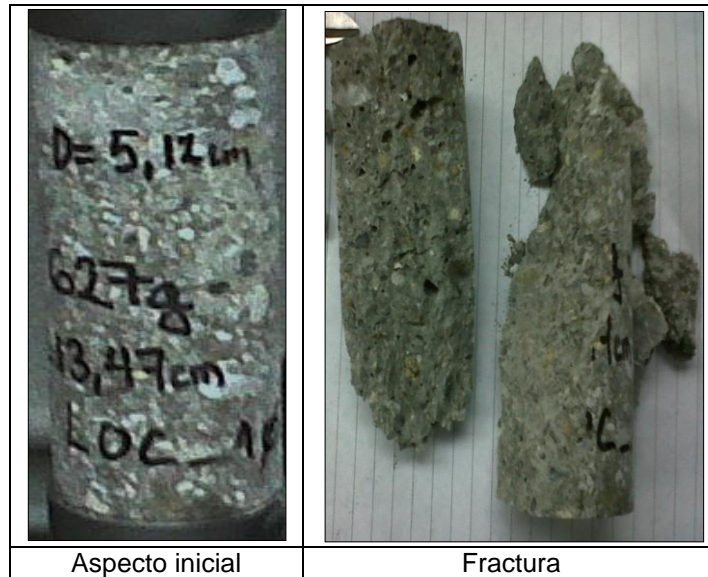


Figura 114 Espécimen 10. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

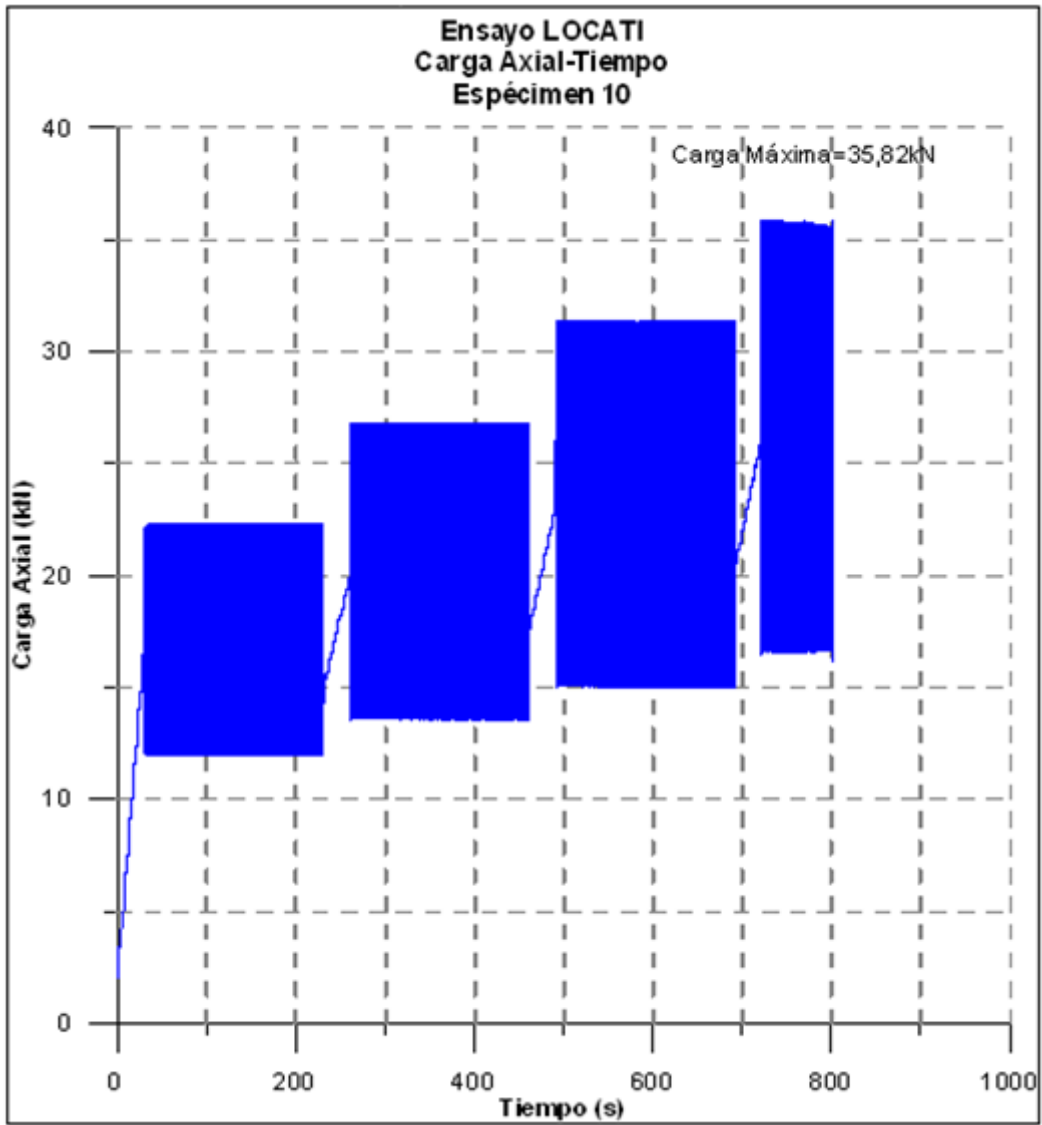


Figura 115 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 10. Ensayo LOCATI. Elaboración propia.

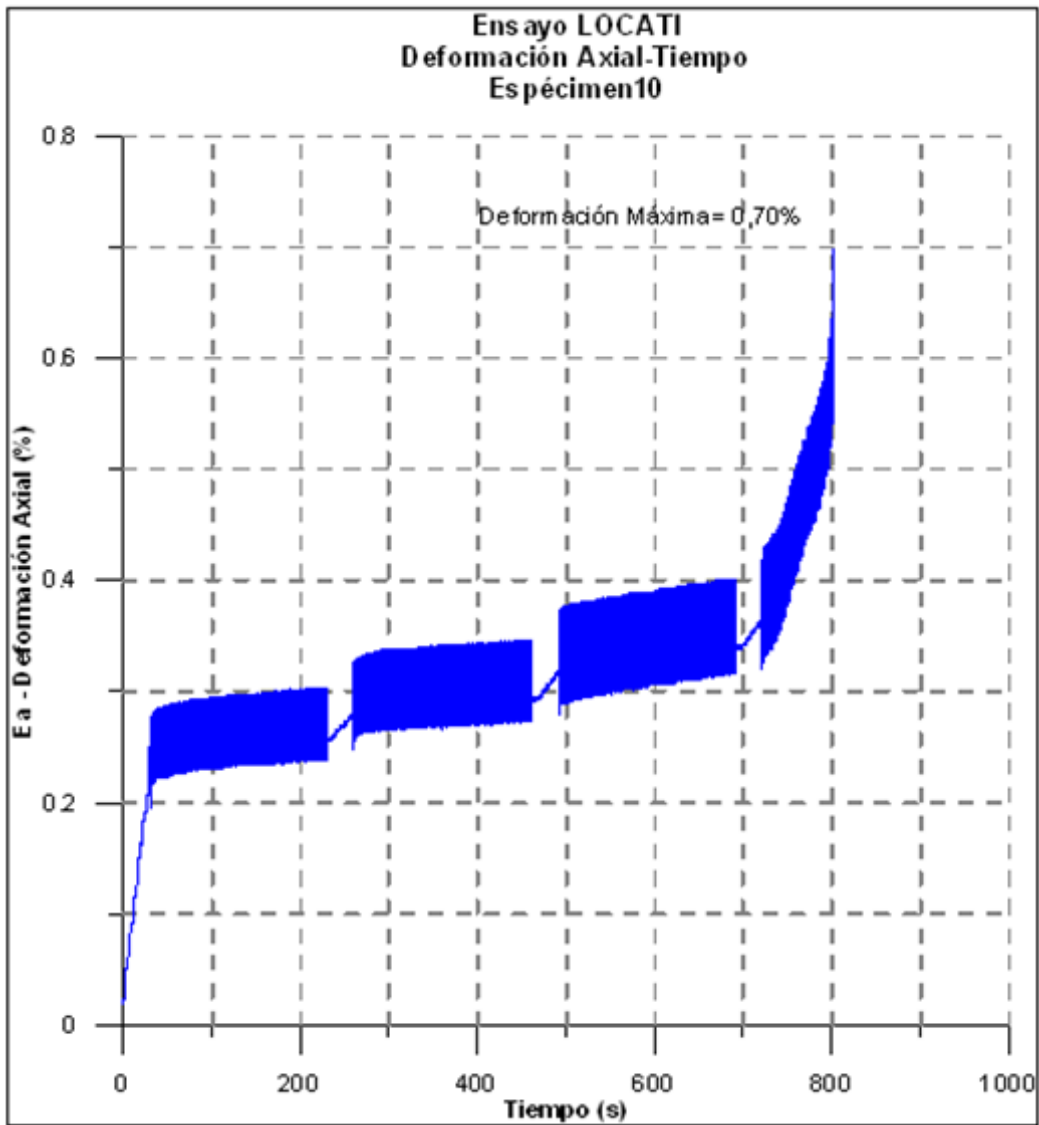


Figura 116 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 13. Ensayo LOCATI. Elaboración propia.

En la figura 116 se presenta el resultado del ensayo sobre el espécimen 10 donde se observa que la muestra resiste prácticamente tres etapas crecientes de umbrales de esfuerzos de mil ciclos cada uno, en la cuarta etapa el material falla y se aprecia que la deformación antes de la falla aumenta progresivamente. La falla es para un esfuerzo máximo es del orden del 62% del esfuerzo en compresión simple (carga estática). La muestra a los tres (3) días ya tiene resistencia a la fatiga del orden mayor que la muestra de lechada de referencia

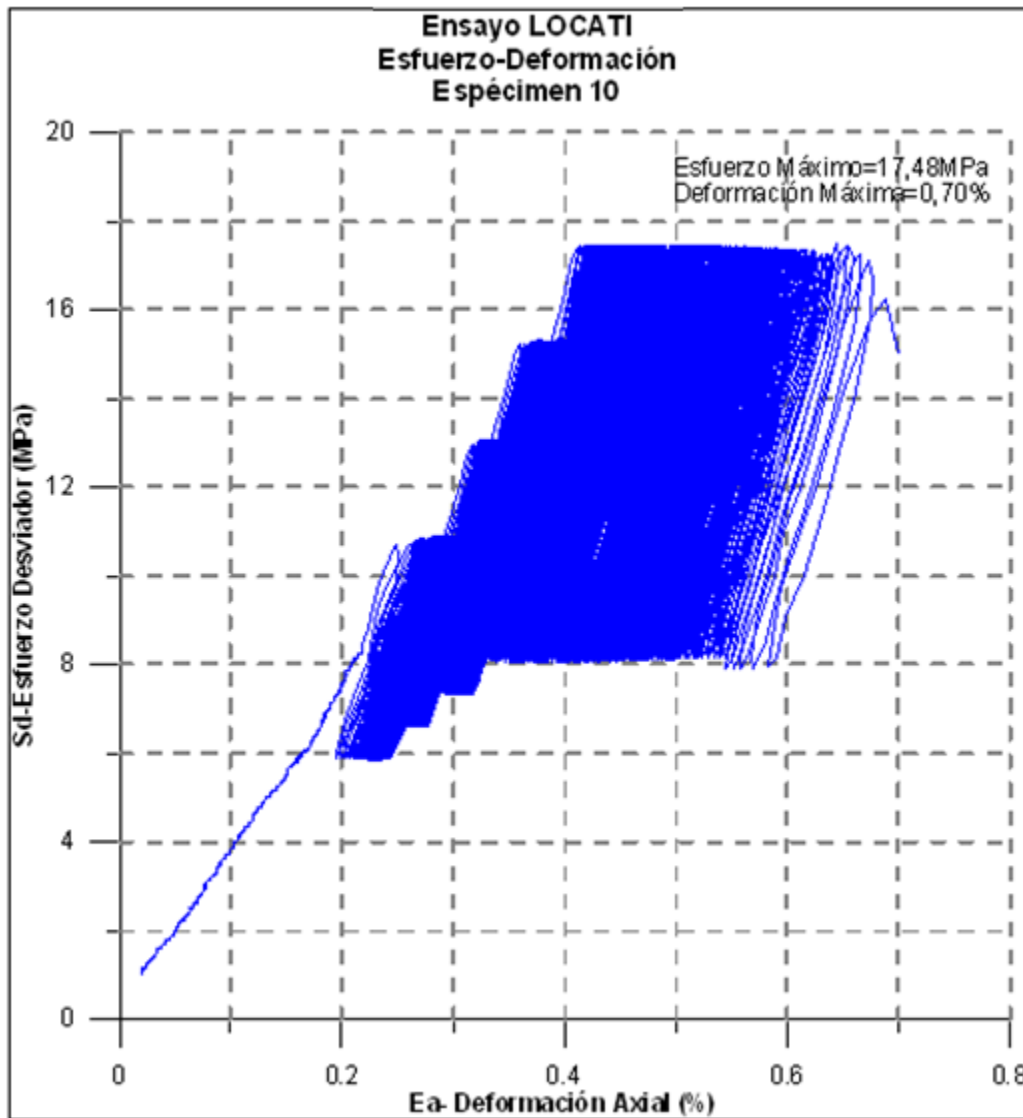


Figura 117 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 13. Ensayo LOCATI. Elaboración propia.

La **Figura 117** presenta la gráfica esfuerzo-deformación del ensayo LOCATI, donde se observa que las tres primeras etapas se mantienen estables y en la cuarta etapa se aumenta en forma creciente la deformación y se amplían los ciclos de histéresis, este comportamiento indica que el material está plastificando y se degrada progresivamente.

#### IV.7.2 Espécimen ensayado a los 7 días de curado

##### ESPÉCIMEN 11

Tabla 69 Datos del espécimen 11. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

Espécimen 11	
Datos del Espécimen	
Altura	128,40 mm
Diámetro	51,20 mm
Área	20,59 cm <sup>2</sup>
Volumen	264,36 cm <sup>3</sup>

Tabla 70 Resultados Obtenidos, espécimen 11. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Duración (ciclos)	
1181,7		5000	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	4520,33	Max	0,7
Min	223,31	Min	0
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,89	Max	219,54
Min	0	Min	10,81

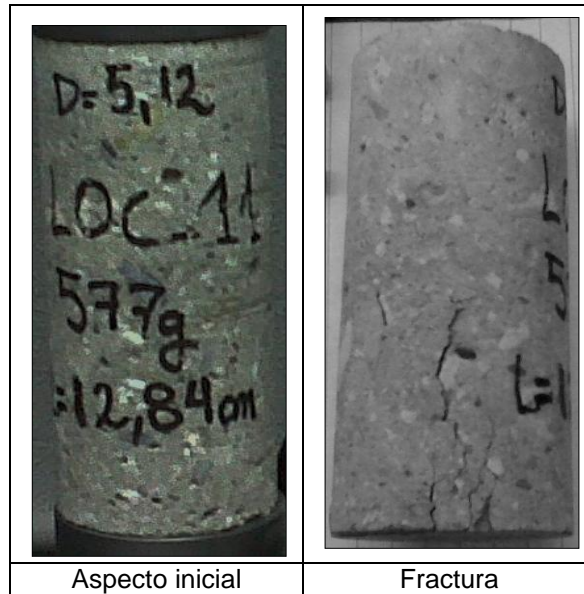


Figura 118 Espécimen 11, Ensayo LOCATI. Elaboración propia

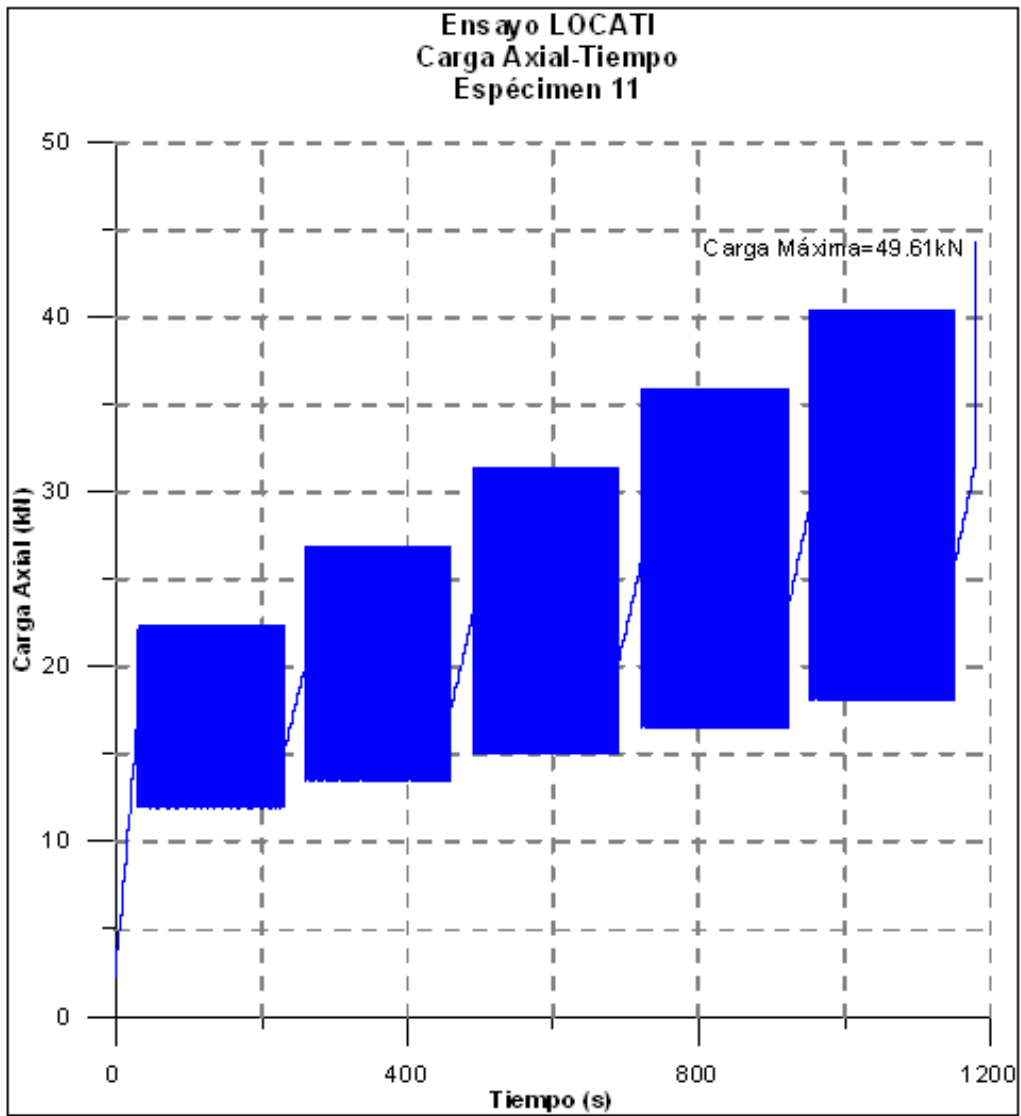


Figura 119 Carga Axial-Tiempo. Especimen 11. Ensayo LOCATI. Elaboración propia.

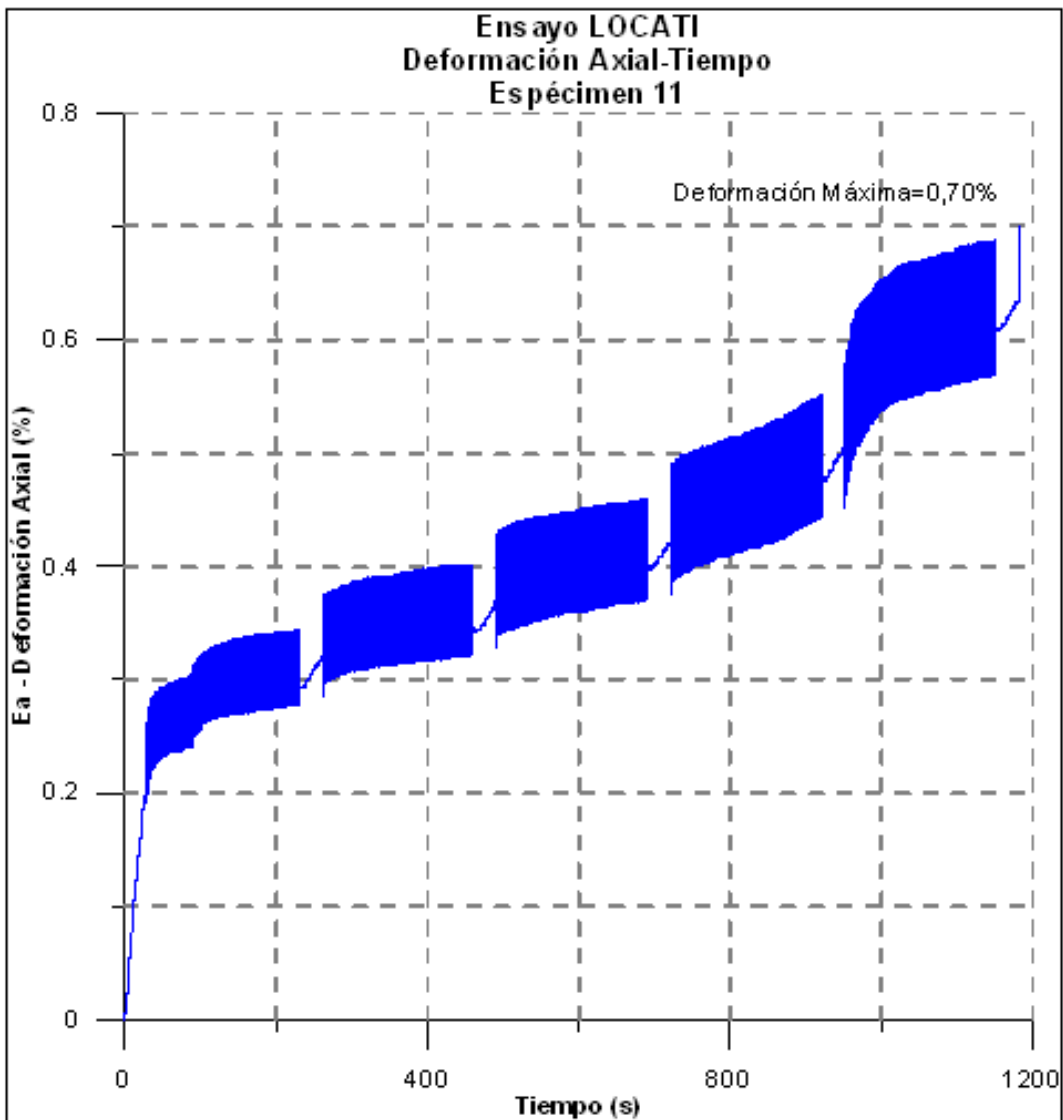


Figura 120 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 11. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

En la Figura 120 se presenta el resultado del ensayo sobre el espécimen 11 donde se observa que la muestra resiste prácticamente cuatro etapas crecientes de umbrales de esfuerzos de mil ciclos cada uno, en la quinta etapa el material falla y se aprecia que la deformación antes de la falla aumenta progresivamente. La falla es para un esfuerzo máximo es del orden del 81% del esfuerzo en compresión simple (carga estática). La muestra a los siete (7) días ya tiene resistencia a la fatiga del orden mayor que la muestra de lechada de referencia, en un porcentaje importante de la resistencia prevista.



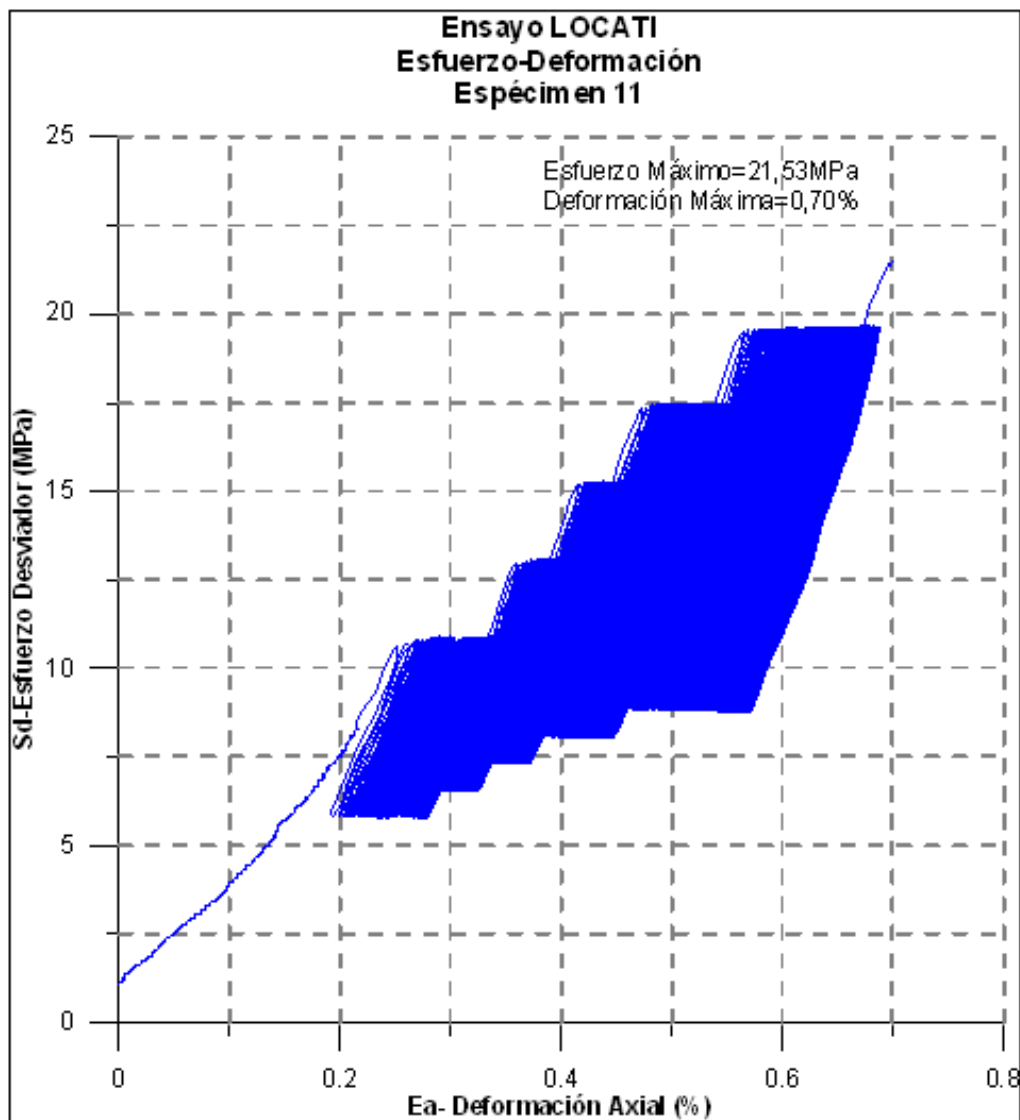


Figura 121 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 11. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

La Figura 121 presenta la gráfica esfuerzo-deformación del ensayo LOCATI, donde se observa que las cuatro primeras etapas se mantienen estables y en la quinta etapa se aumenta en forma creciente la deformación y se amplían los ciclos de histéresis, este comportamiento indica que el material está plastificando y se degrada progresivamente.

## ESPÉCIMEN 12

Tabla 71 Datos del espécimen 12. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

Espécimen 12	
Datos del Espécimen	
Altura	135,10 mm
Diámetro	51,00 mm
Área	20,43 cm <sup>2</sup>
Volumen	275,99 cm <sup>3</sup>

Tabla 72 Resultados Obtenidos, espécimen 12. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Duración (ciclos)	
1139,89		4941	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	4116,53	Max	0,96
Min	208,02	Min	0,02
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,71	Max	201,60
Min	0,02	Min	10,20

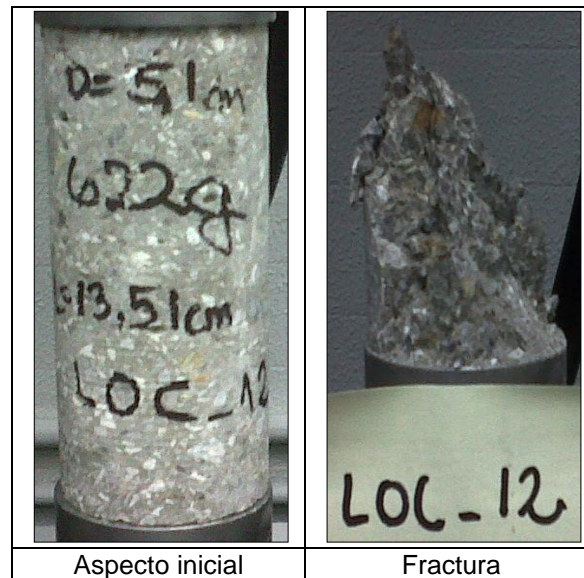


Figura 122 Espécimen 12, Ensayo LOCATI. Elaboración propia

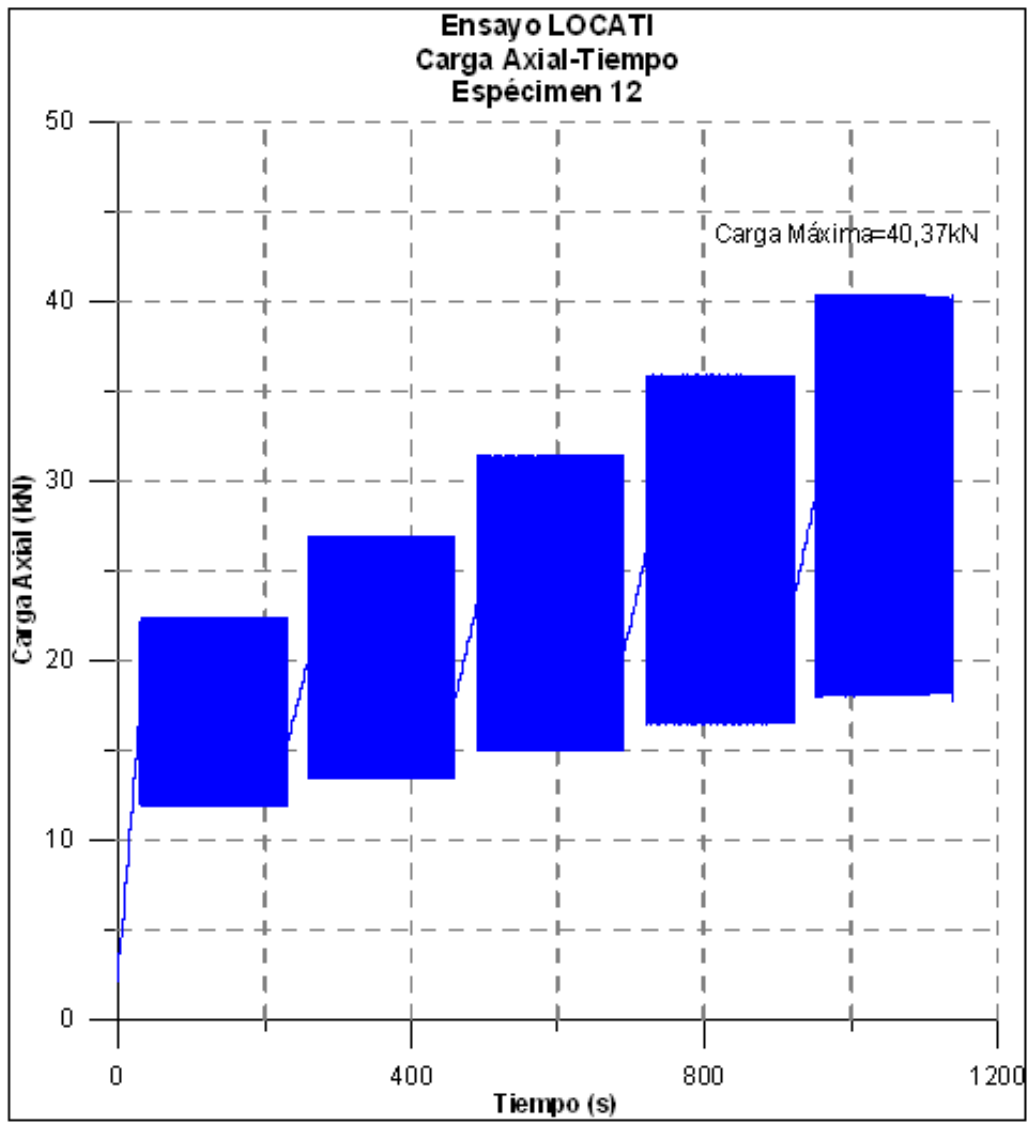


Figura 123 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 12. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

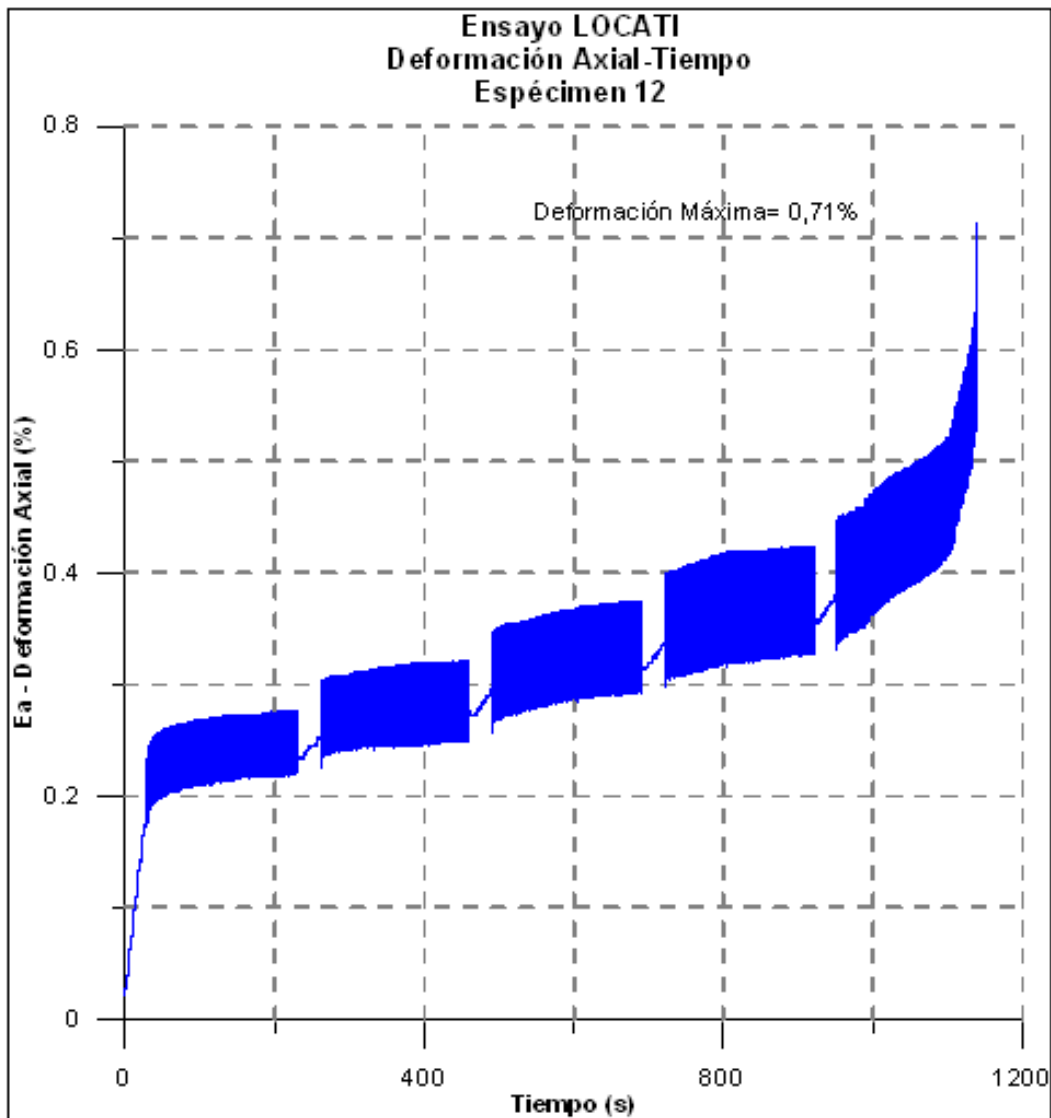


Figura 124 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 12. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

En la Figura 124 se presenta el resultado del ensayo sobre el espécimen 12 donde se observa que la muestra resiste prácticamente tres etapas crecientes de umbrales de esfuerzos de mil ciclos cada uno, en la cuarta etapa el material falla y se aprecia que la deformación antes de la falla aumenta progresivamente. Lo particular de la falla es que el esfuerzo de falla máxima es del orden del 60% del esfuerzo en compresión simple (carga estática). Se comprueba que se mantienen los resultados de la muestra anterior que es del mismo tiempo de vaciado.

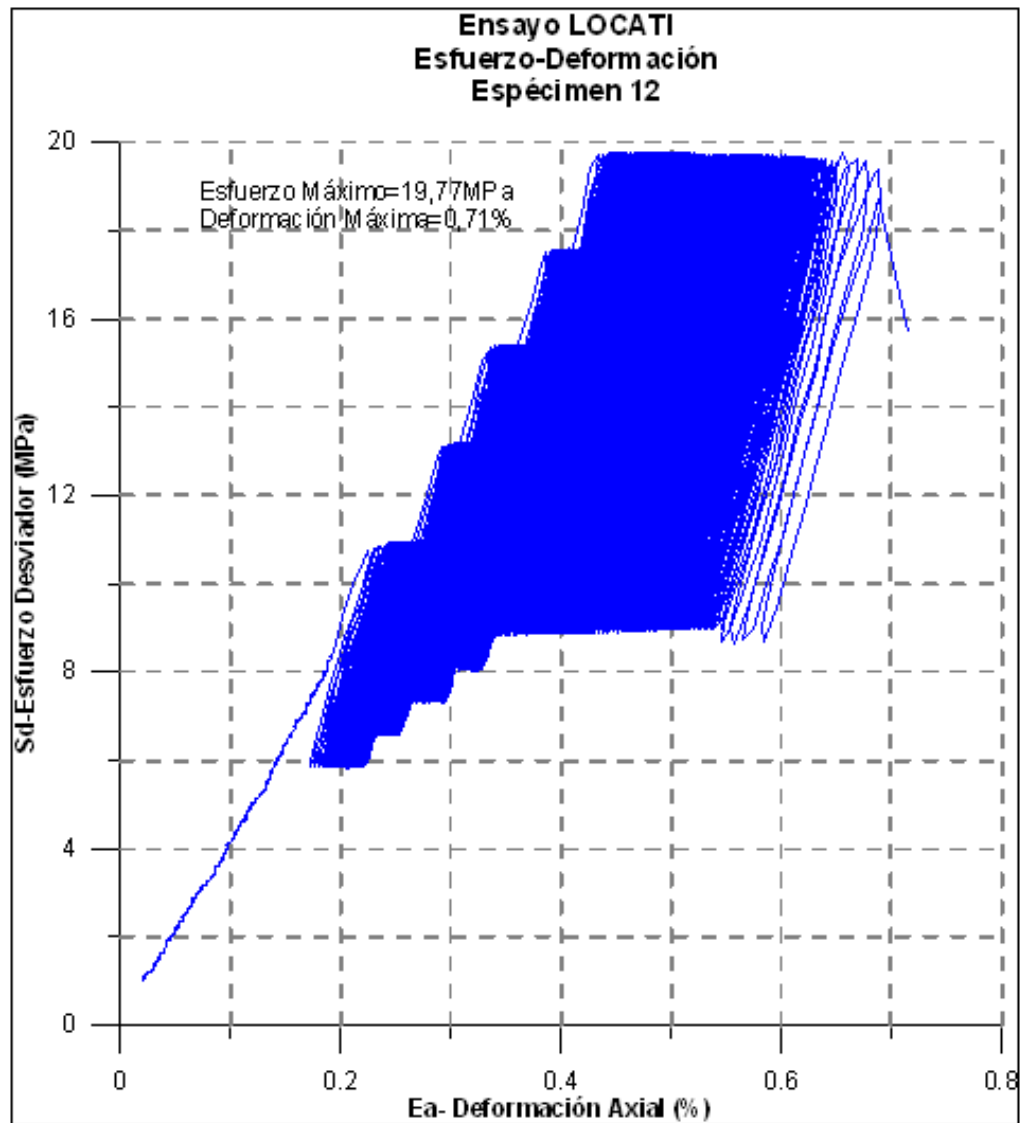


Figura 125 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 12. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

La Figura 125 presenta la gráfica esfuerzo-deformación del ensayo LOCATI, donde se observa que las tres primeras etapas se mantienen estables y en la cuarta etapa se aumenta en forma creciente la deformación y se amplían los ciclos de histéresis, este comportamiento indica que el material está plastificando y se degrada progresivamente. Se comprueba que se mantienen los resultados de la muestra anterior que es del mismo tiempo de vaciado.

### IV.7.3 Espécimen ensayado a los 14 días de curado

#### ESPÉCIMEN 13

Tabla 73 Datos del espécimen 13. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

Espécimen 13	
Datos del Espécimen	
Altura	134,70 mm
Diámetro	51,20 mm
Área	20,59 cm <sup>2</sup>
Volumen	277,33 cm <sup>3</sup>

Tabla 74 Resultados Obtenidos, espécimen 13. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Duración (ciclos)	
1583,4		6855	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	5058,73	Max	0,80
Min	214,14	Min	0,03
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,59	Max	245,65
Min	0,03	Min	10,29

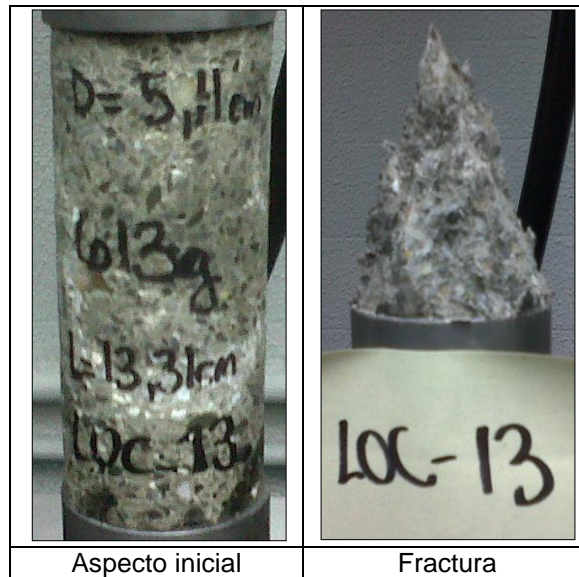


Figura 126 Espécimen 13, Ensayo LOCATI. Elaboración propia

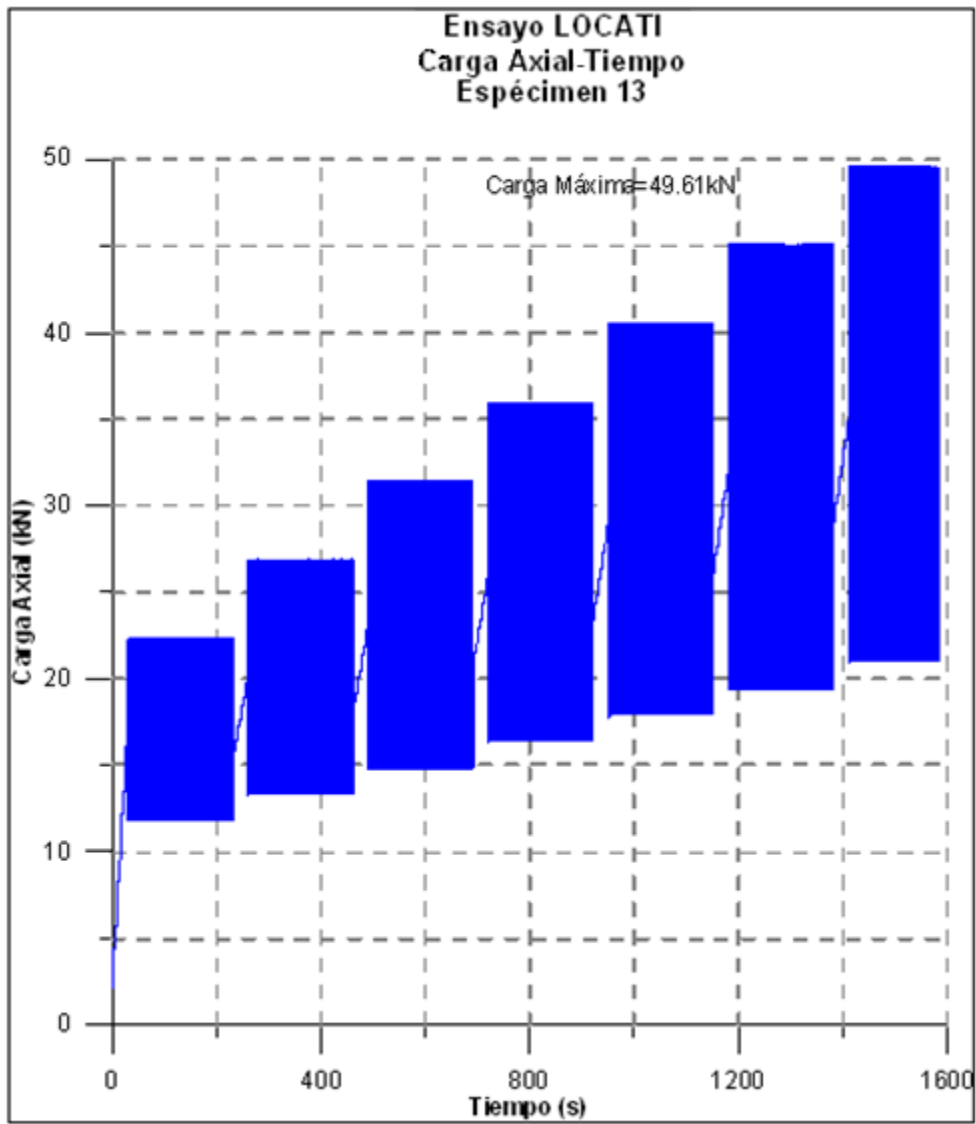


Figura 127 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 13. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

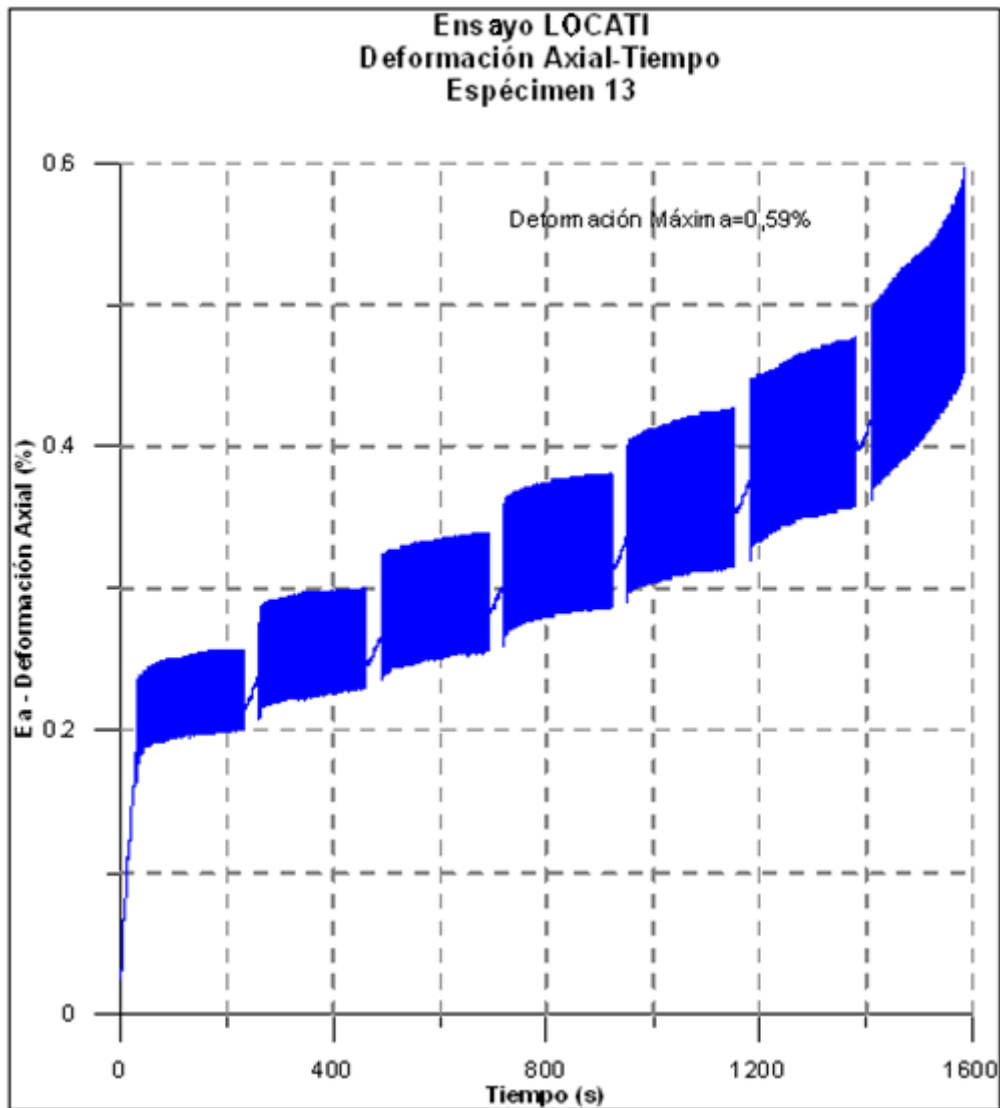


Figura 128 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 13. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

En la Figura 128 se presenta el resultado del ensayo sobre el espécimen 13 donde se observa que la muestra resiste prácticamente seis etapas crecientes de umbrales de esfuerzos de mil ciclos cada uno, en la séptima etapa el material falla y se aprecia que la deformación antes de la falla aumenta progresivamente, el comienzo de la falla es en la etapa seis donde crecen las deformaciones de forma sostenida. La falla es para un esfuerzo máximo es del orden del 90% del esfuerzo en compresión simple (carga estática). La muestra a los catorce (14) días ya tiene resistencia a la fatiga del orden mayor que la muestra de lechada de referencia y llega al nivel previsto de resistencia del material propuesto.



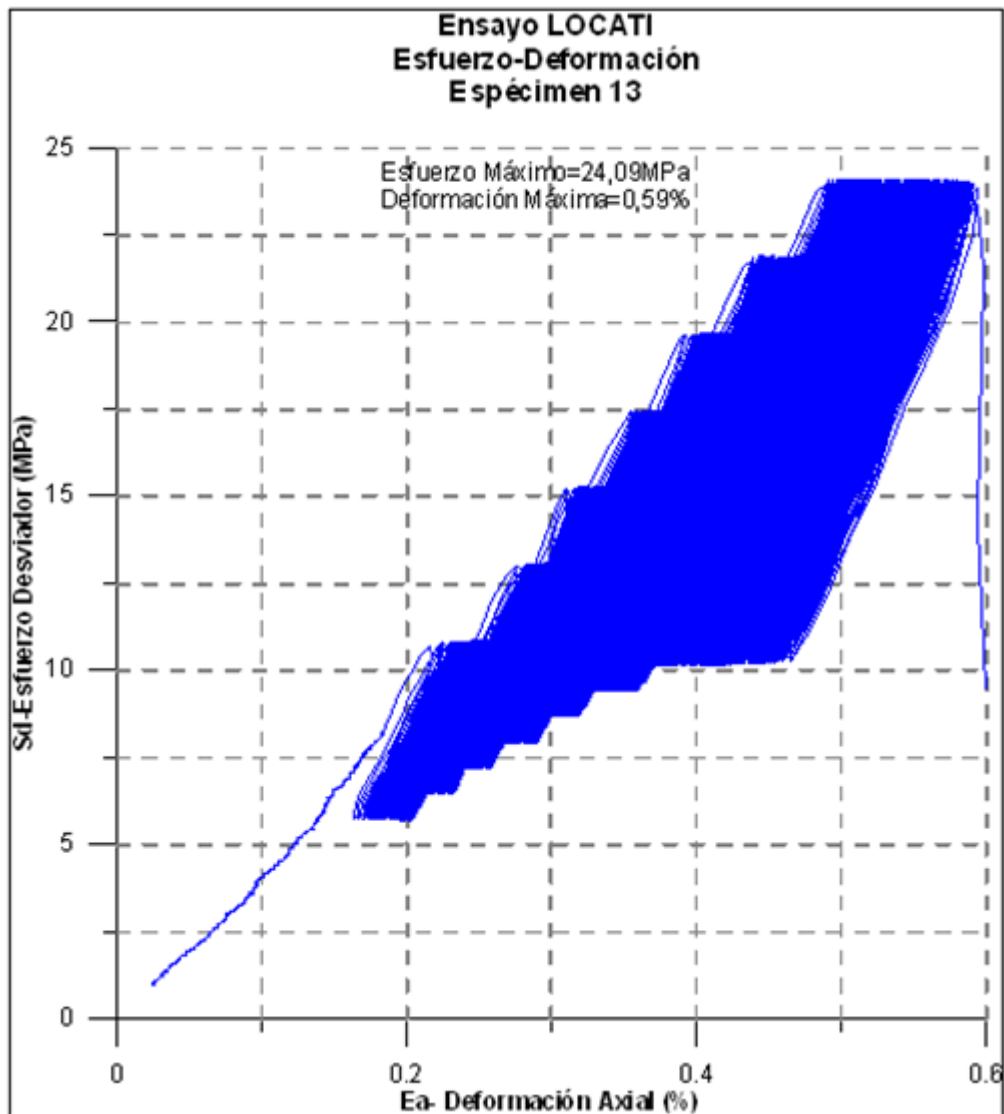


Figura 129 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 13. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

La Figura 129 presenta la gráfica esfuerzo-deformación del ensayo LOCATI, donde se observa que las seis primeras etapas se mantienen estables y en la séptima etapa se aumenta en forma creciente la deformación y se amplían los ciclos de histéresis, este comportamiento indica que el material está plastificando y se degrada progresivamente.

#### IV.7.4 Espécimen ensayado a los 28 días de curado

##### ESPÉCIMEN 14

Tabla 75 Datos del espécimen 14. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

Espécimen 14	
Datos del Espécimen	
Altura	132,90 mm
Diámetro	51,20 mm
Área	20,59 cm <sup>2</sup>
Volumen	273,62 cm <sup>3</sup>

Tabla 76 Resultados Obtenidos, espécimen 14. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)		Duración (ciclos)	
1984,6		8559	
Carga Axial (Kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	5992,78	Max	0,69
Min	208,02	Min	0,02
Desplazamiento Axial (mm)		Esfuerzo Desviador (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	0,91	Max	291,13
Min	0,03	Min	10,10

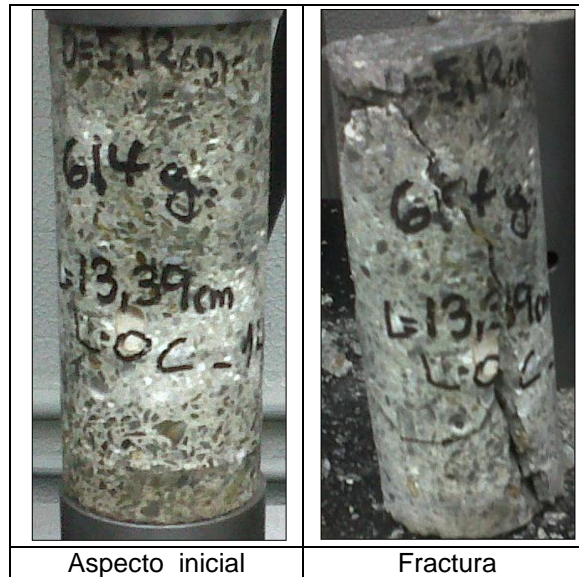


Figura 130 Espécimen 14, Ensayo LOCATI. Elaboración propia

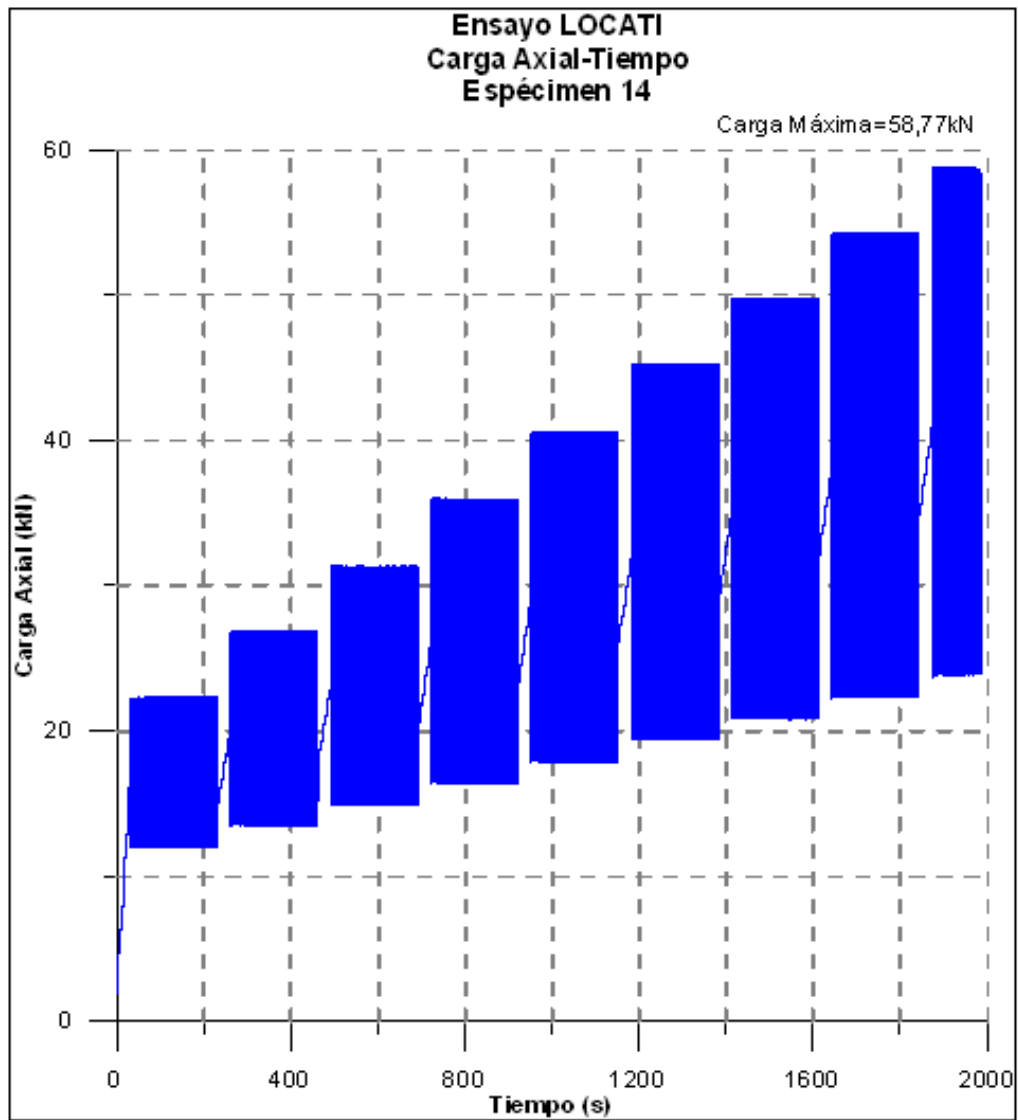


Figura 131 Carga Axial-Tiempo. Espécimen 14. Ensayo LOCATI. Elaboración propia.

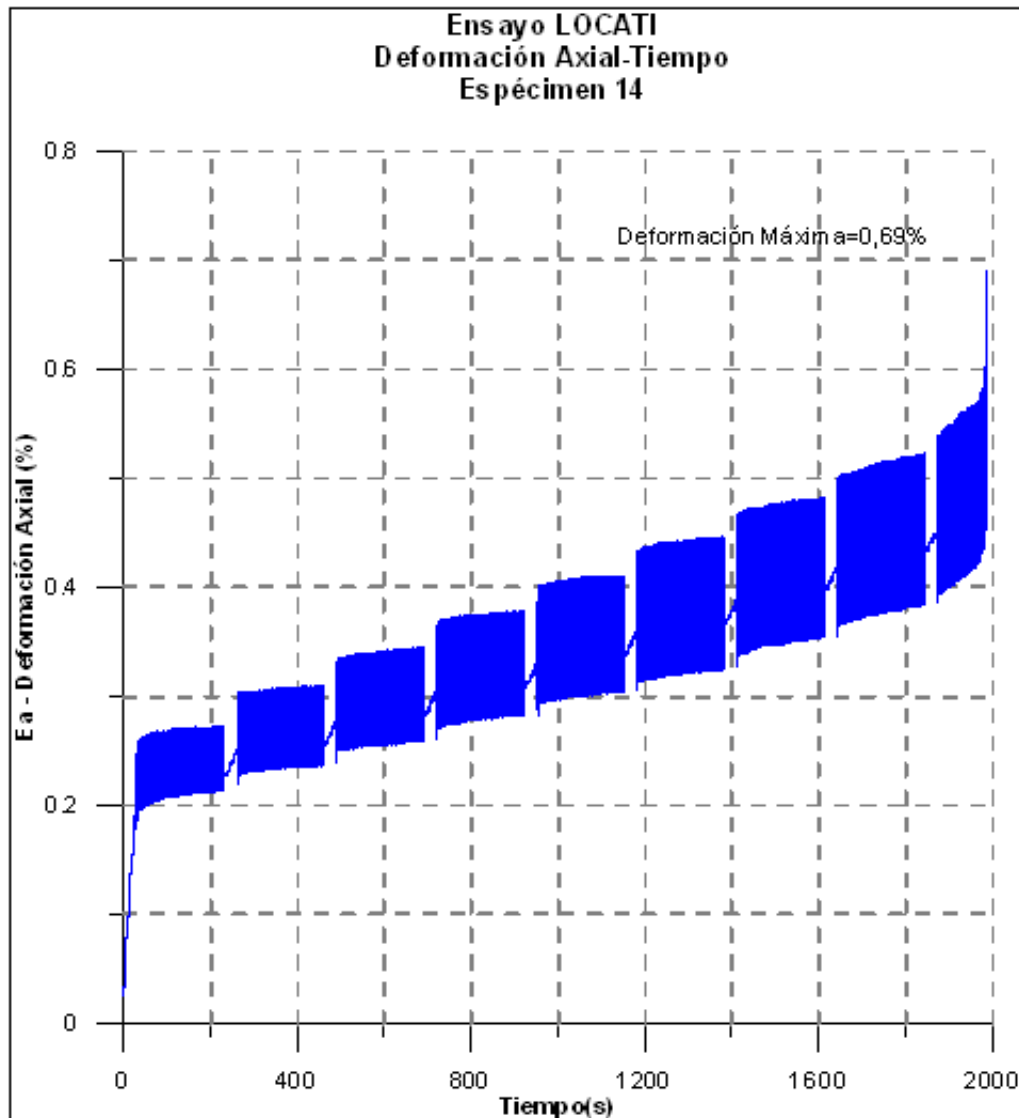


Figura 132 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 14. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

En la Figura 132 se presenta el resultado del ensayo sobre el espécimen 10 donde se observa que la muestra resiste prácticamente ocho etapas crecientes de umbrales de esfuerzos de mil ciclos cada uno, en la novena etapa el material falla y se aprecia que la deformación antes de la falla aumenta progresivamente, el comienzo de la falla es en la etapa ocho donde crecen las deformaciones de forma sostenida. La falla es para un esfuerzo máximo es del orden del 98% del esfuerzo en compresión simple (carga estática). La muestra a los veintiocho (28) días ya tiene resistencia a la fatiga del orden mayor que la muestra de lechada de referencia y llega al nivel previsto de resistencia del material propuesto.

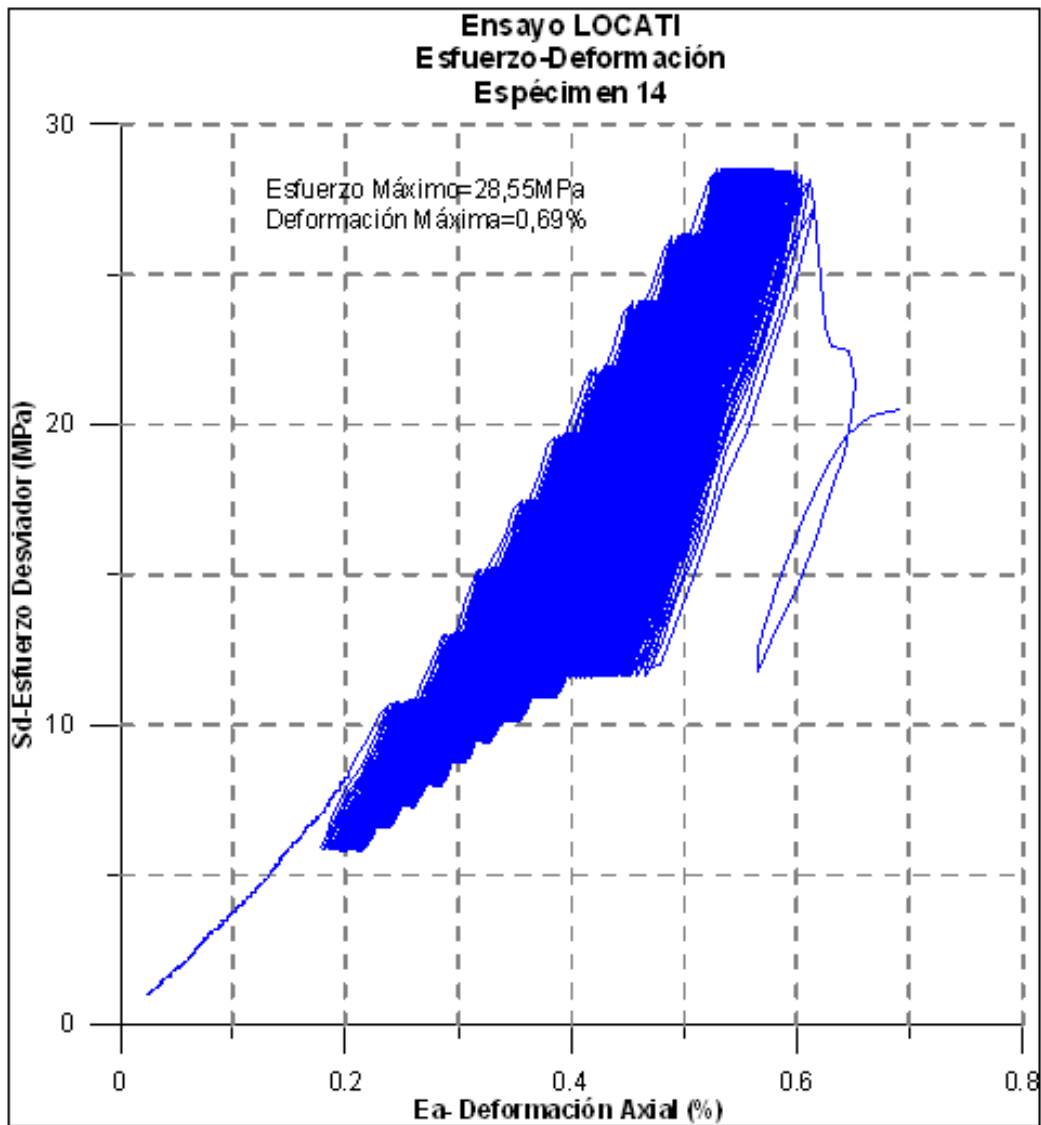


Figura 133 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Espécimen 14. Ensayo LOCATI. Elaboración propia

La Figura 133 presenta la gráfica esfuerzo-deformación del ensayo LOCATI, donde se observa que las ocho primeras etapas se mantienen estables y en la novena etapa se aumenta en forma creciente la deformación y se amplían los ciclos de histéresis, este comportamiento indica que el material está plastificando y se degrada progresivamente.

#### **IV.8 ENSAYO DE CORTE DIRECTO**

Se presentan a continuación los ensayos sobre 6 muestras sometidas a corte directo, tomando como criterio el ensayo de rocas. Para este criterio se estableció que los resultados permitirían estimar los valores referenciales de comportamiento del concreto como parte integral de los modelos de material utilizados para el cálculo y chequeo de obras subterráneas.

La diferencia con los ensayos iniciales de tracción indirecta y compresión simple para estimar los parámetros es que el ensayo de corte directo se realiza a la muestra en distintas direcciones o planos principales de esfuerzos, referenciando la posibilidad de planos débiles en los vaciados, influencia de la dirección de vaciado y consideraciones de la aleatoriedad de colocación por inyección.

Los resultados permitirán establecer la capacidad del material de inyección propuesto para que se integre con el medio circundante.

Para completar los parámetros requeridos para ver el comportamiento del material propuesto como elemento integral en obras subterráneas se calcula la cohesión y el ángulo de fricción interna tomando en consideración varios ángulos de falla.

#### IV.8.1 Tendencia de Esfuerzos para cada espécimen

##### ESPÉCIMEN 11

Tabla 77 Datos del espécimen 11. Ensayo de Corte Directo. Elaboración propia

Espécimen: 11	
Descripción	
Tipo:	Cilíndrica
Altura:	85 (mm)
Diámetro:	50 (mm)
Área de la superficie cortante: Circular	
Ángulo de inclinación de la vertical: 90°	

Tabla 78 Esfuerzos pico y residuales. Especimen 11 en sus 4 etapas. Elaboración propia

Especificaciones		Max(Pico)		Final (Residual)	
		Sn	T	Sn	T
		Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Especimen 11	Etapa 1	106,12	168,17	106,12	119,10
Especimen 11	Etapa 2	217,09	131,05	216,41	126,39
Especimen 11	Etapa 3	442,42	200,58	442,25	196,39
Especimen 11	Etapa 4	692,79	340,91	692,50	337,53

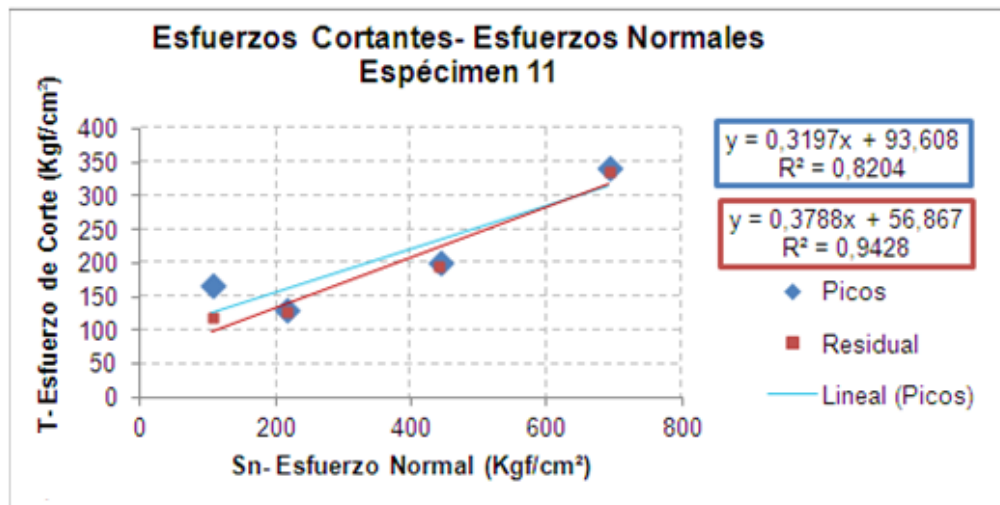


Figura 134 Tendencias de Esfuerzos de Corte-Esfuerzos Normales. Especimen 11. Elaboración propia

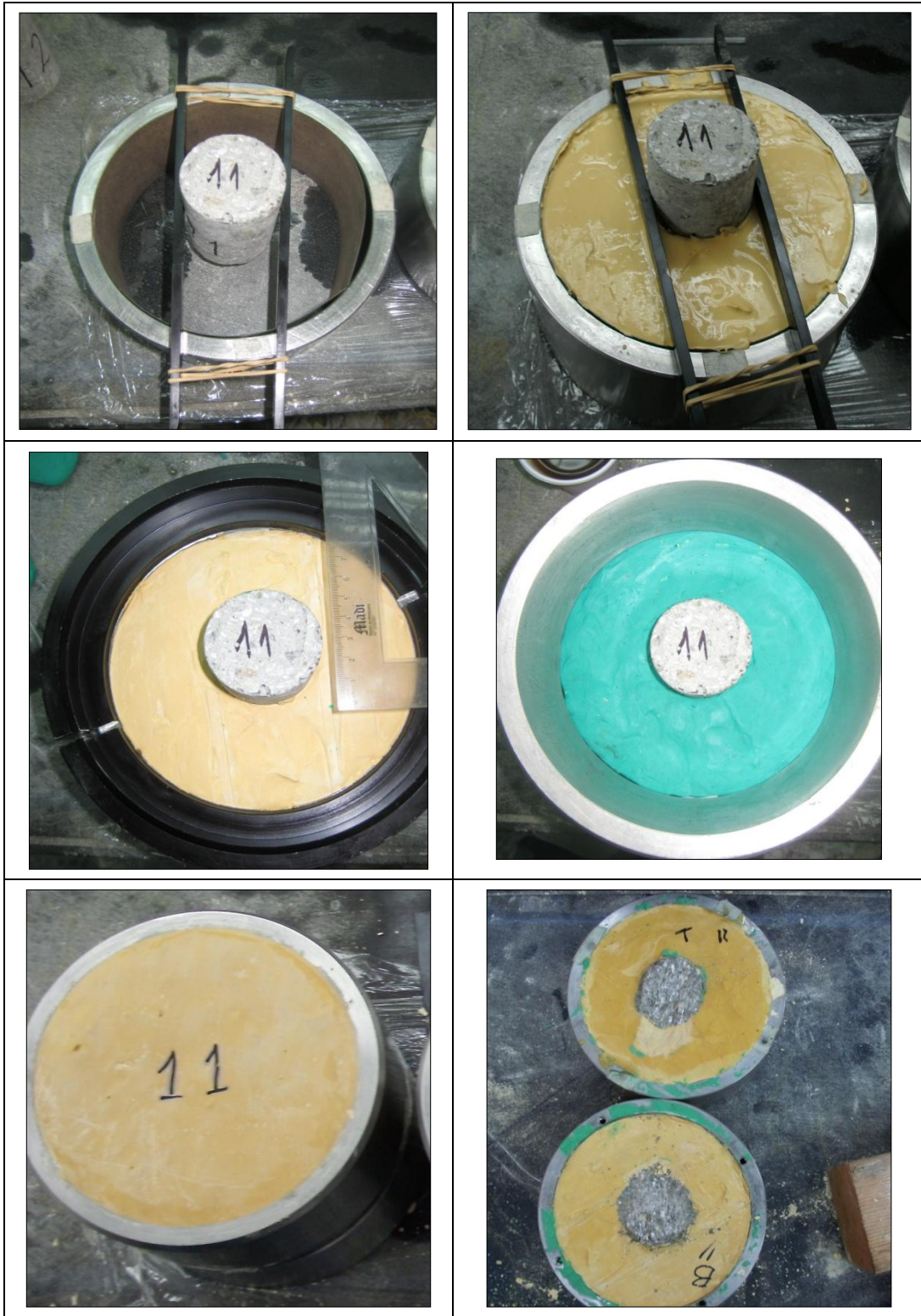


Figura 135 Ensayo de Corte Directo, espécimen 11. Elaboración propia.



## ESPÉCIMEN 12

Tabla 79 Datos del espécimen 12. Ensayo de Corte Directo. Elaboración propia

Espécimen: 12	
Descripción	
Tipo:	Cilíndrica
Altura:	95 (mm)
Diámetro:	50 (mm)
Área de la superficie cortante: Elíptica	
Ángulo de inclinación de la vertical: 60°	

Tabla 80 Esfuerzos pico y residuales. Espécimen 12 en sus 4 etapas. Elaboración propia

Especificaciones		Max(Pico)		Final (Residual)	
		Sn	T	Sn	T
		Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Espécimen 12	Etapa 1	53,06	79,56	52,99	41,24
Espécimen 12	Etapa 2	112,06	78,86	112,06	66,04
Espécimen 12	Etapa 3	237,99	149,65	237,32	105,19
Espécimen 12	Etapa 4	384,91	208,37	383,04	143,62

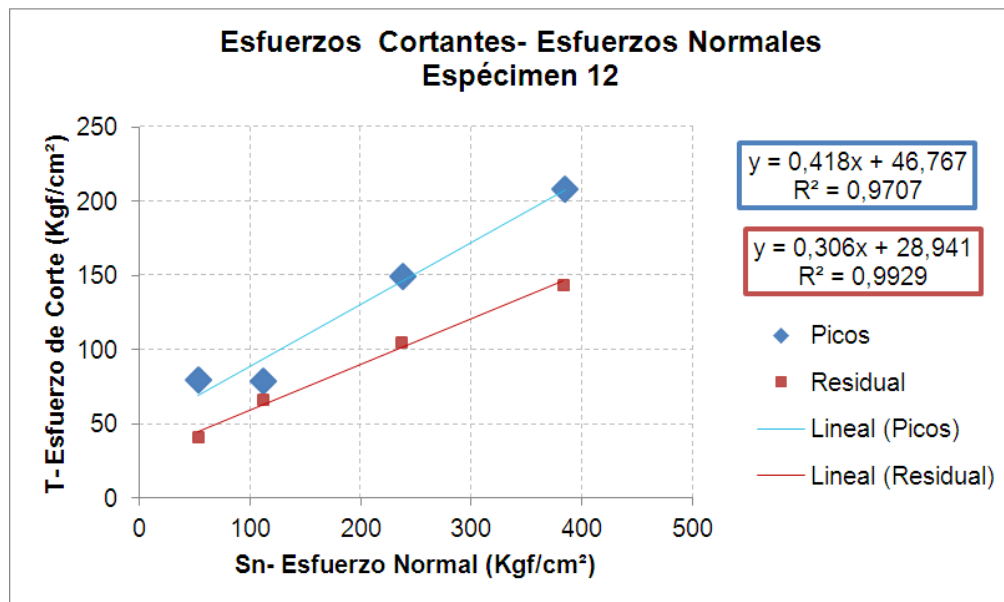


Figura 136 Tendencias de Esfuerzos de Corte-Esfuerzos Normales. Espécimen 12. Elaboración propia

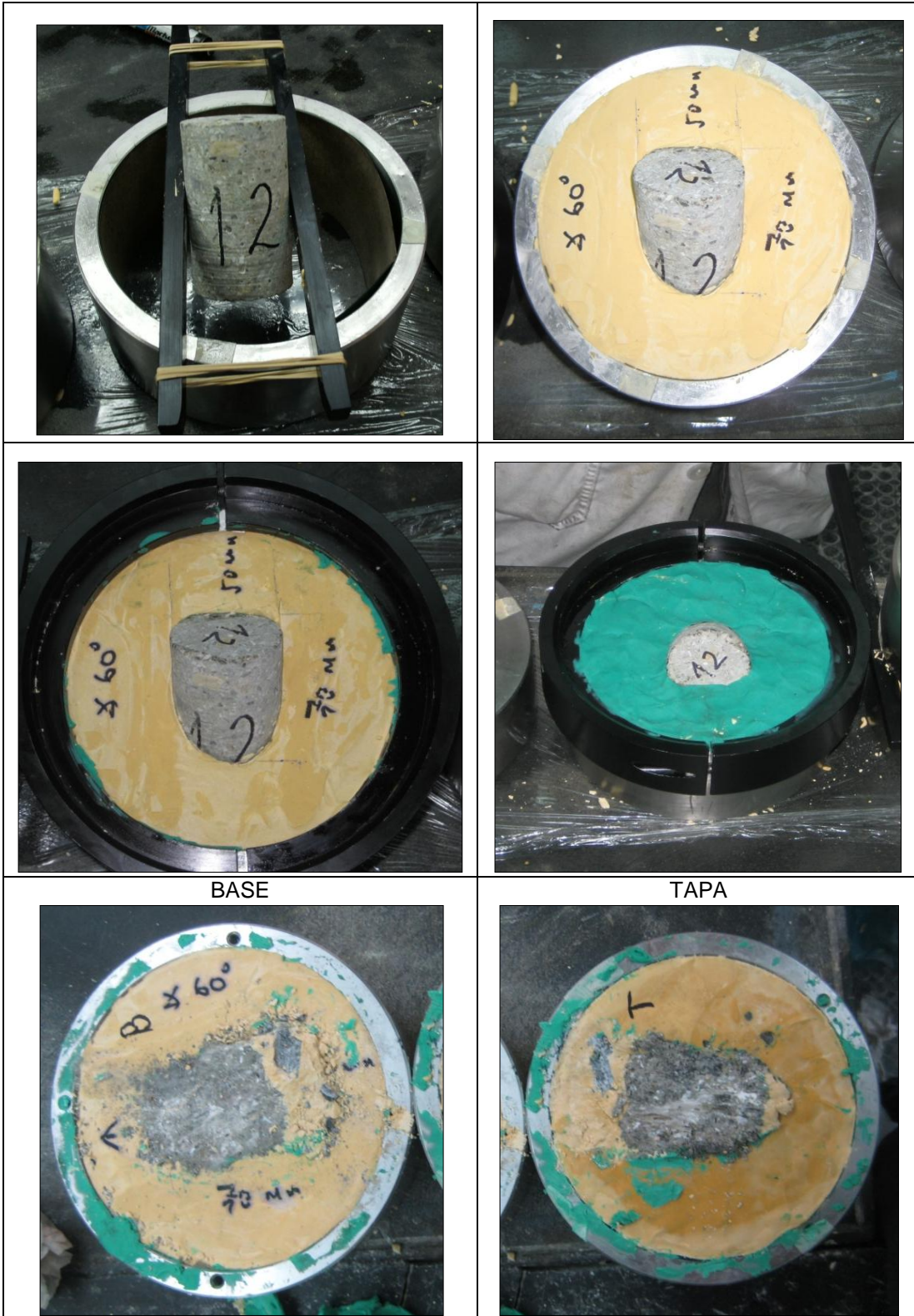


Figura 137 Ensayo de Corte Directo, espécimen 12. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 13A

Tabla 81 Datos del espécimen 13A. Ensayo de Corte Directo. Elaboración propia

Espécimen: 13A	
Descripción	
Tipo:	Cilíndrica
Altura:	39 (mm)
Diámetro:	50 (mm)
Área de la superficie cortante: Circular	
Ángulo de inclinación de la vertical: 0°	

Tabla 82 Esfuerzos pico y residuales. Espécimen 13A en sus 4 etapas. Elaboración propia

Especificaciones		Max(Pico)		Final (Residual)	
		Sn	T	Sn	T
		Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Espécimen 13A	Etapa 1	109,18	136,02	109,05	73,47
Espécimen 13A	Etapa 2	364,78	217,95	364,78	200,87
Espécimen 13A	Etapa 3	479,99	234,10	478,18	175,58
Espécimen 13A	Etapa 4				

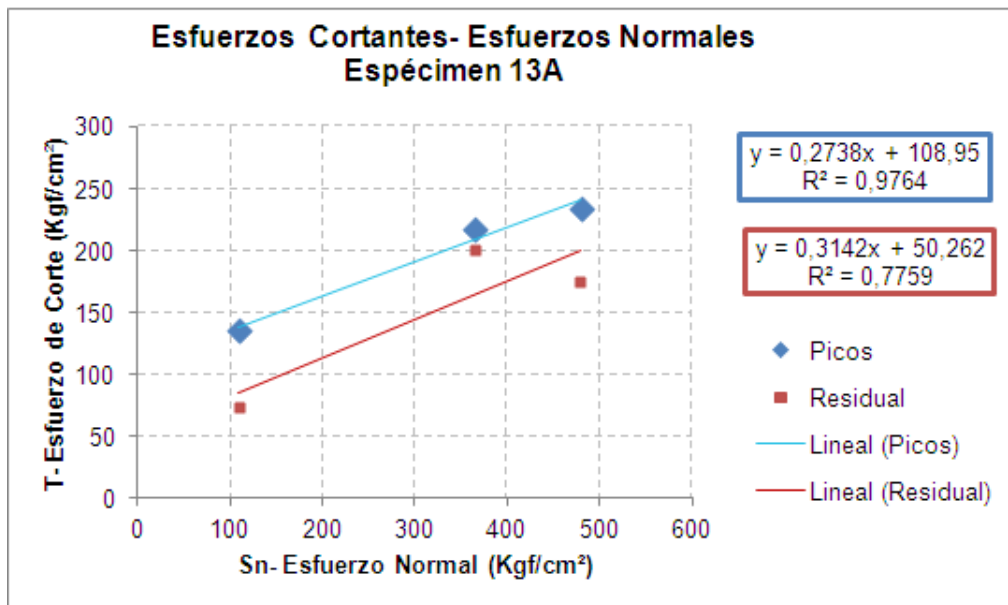
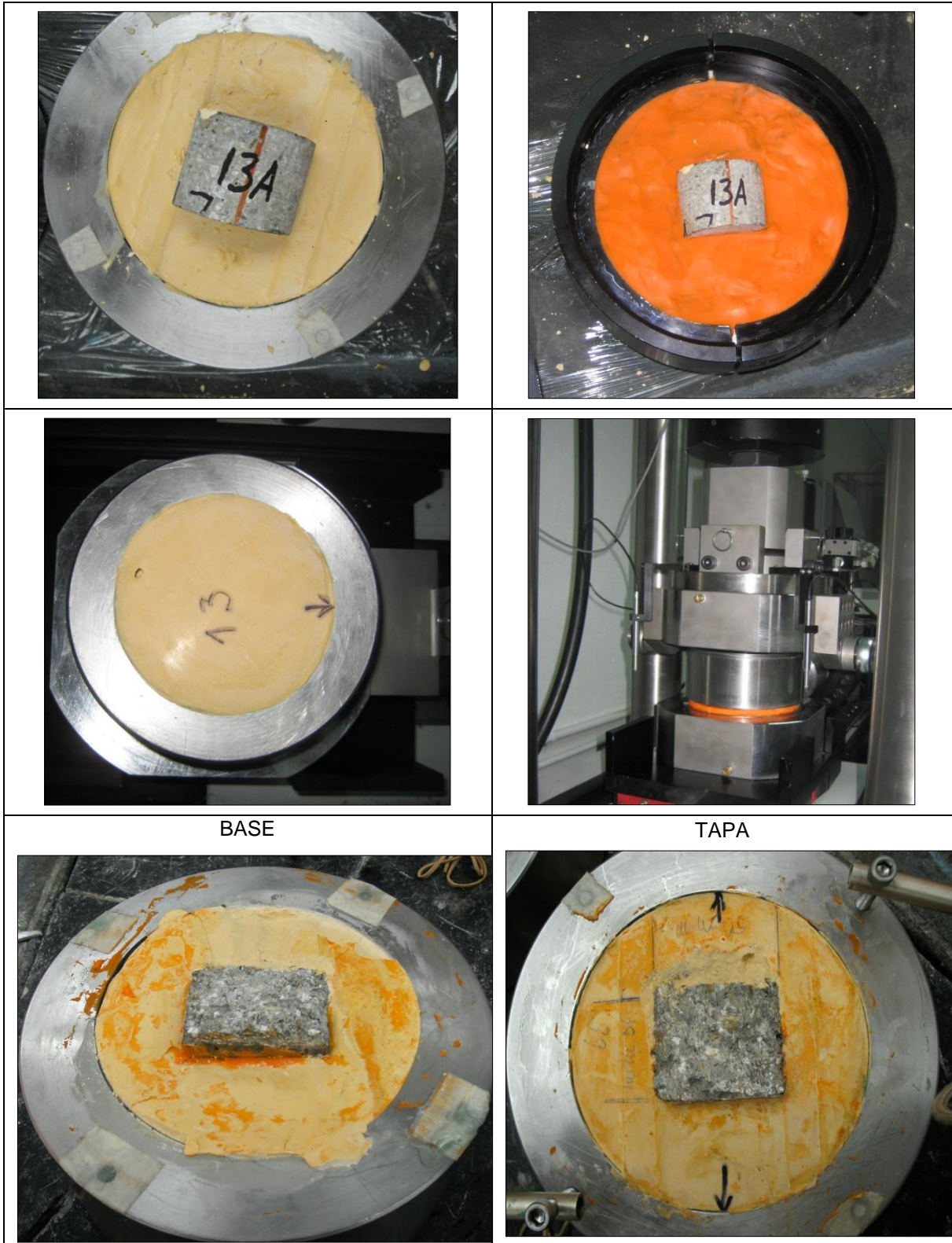


Figura 138 Tendencias de Esfuerzos de Corte-Esfuerzos Normales. Espécimen 13A. Elaboración propia



BASE

TAPA

Figura 139 Ensayo de Corte Directo, espécimen 13A. Elaboración propia.

## ESPÉCIMEN 13B

Tabla 83 Datos del espécimen 13B. Ensayo de Corte Directo. Elaboración propia

Espécimen: 13B	
Descripción	
Tipo:	Cilíndrica
Altura:	41,9 (mm)
Diámetro:	51,75 (mm)
Área de la superficie cortante: Circular	
Ángulo de inclinación de la vertical: 0°	

Tabla 84 Esfuerzos pico y residuales. Espécimen 13B en sus 4 etapas. Elaboración propia

ESPECIFICACIONES		Max(Pico)		Final (Residual)	
		Sn	T	Sn	T
		Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Espécimen 13B	Etapa 1	99,10	126,59	97,92	81,99
Espécimen 13B	Etapa 2	208,34	114,47	208,34	100,42
Espécimen 13B	Etapa 3	428,79	194,70	428,76	194,70
Espécimen 13B	Etapa 4	767,29	316,16	767,29	316,16

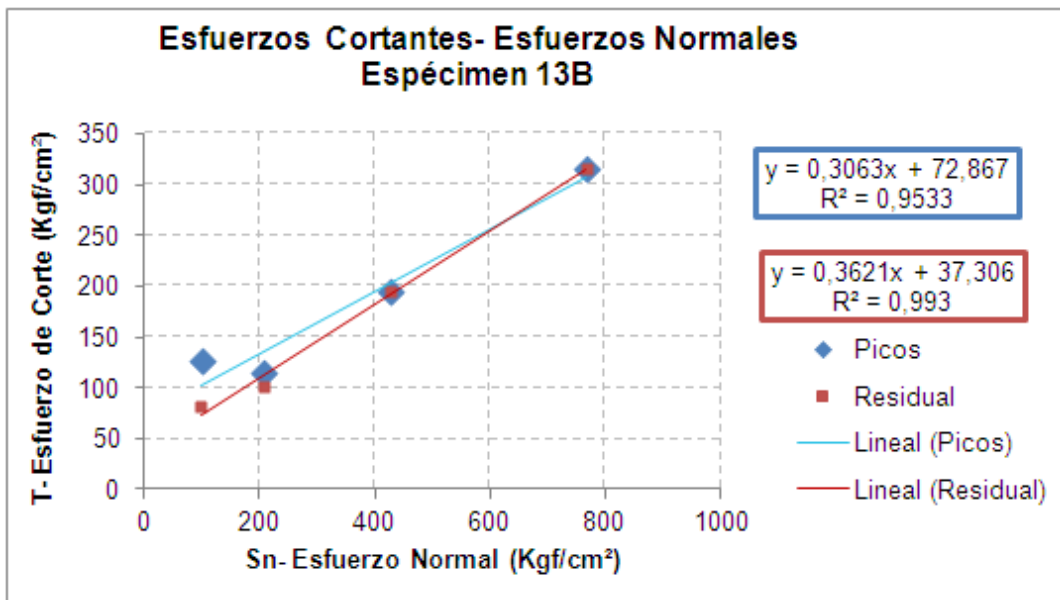


Figura 140 Tendencias de Esfuerzos de Corte-Esfuerzos Normales. Espécimen 13B. Elaboración propia

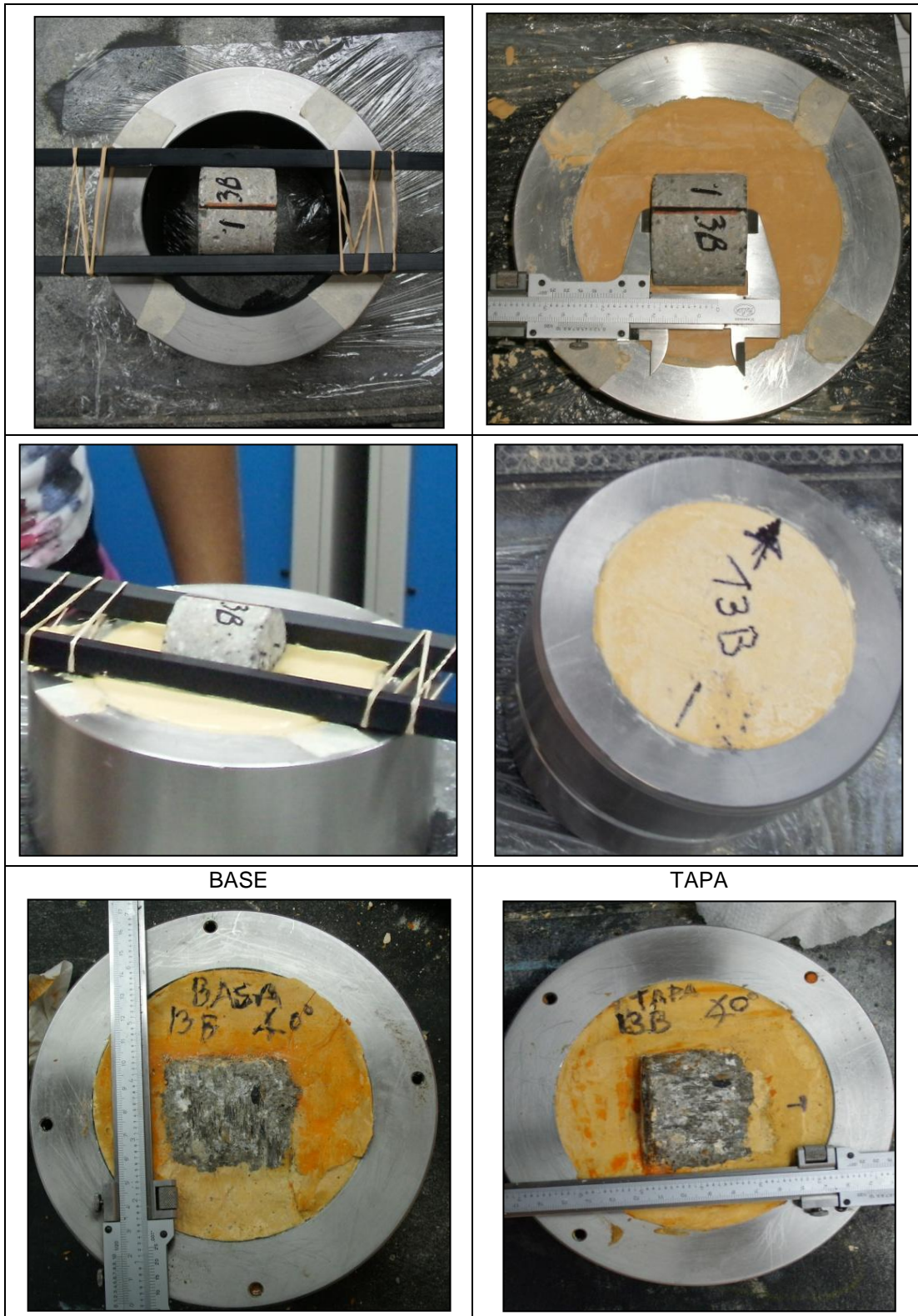


Figura 141 Ensayo de Corte Directo, espécimen 13B. Elaboración propia

## ESPÉCIMEN 14

Tabla 85 Datos del espécimen 14. Ensayo de Corte Directo. Elaboración propia

<b>Espécimen: 14</b>	
<b>Descripción</b>	
Tipo:	Cilíndrica
Altura:	93,9 (mm)
Diámetro:	51,2 (mm)
Área de la superficie cortante: Circular	
Ángulo de inclinación de la vertical: 30°	

Tabla 86 Esfuerzos pico y residuales. Espécimen 14 en sus 4 etapas. Elaboración propia

ESPECIFICACIONES		Max(Pico)		Final (Residual)	
		Sn	T	Sn	T
		Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Espécimen 14	Etapa 1	92,28	162,58	92,24	141,06
Espécimen 14	Etapa 2	181,92	251,50	181,65	186,02
Espécimen 14	Etapa 3	378,18	286,19	378,06	283,80
Espécimen 14	Etapa 4	650,81	449,01	650,81	446,71

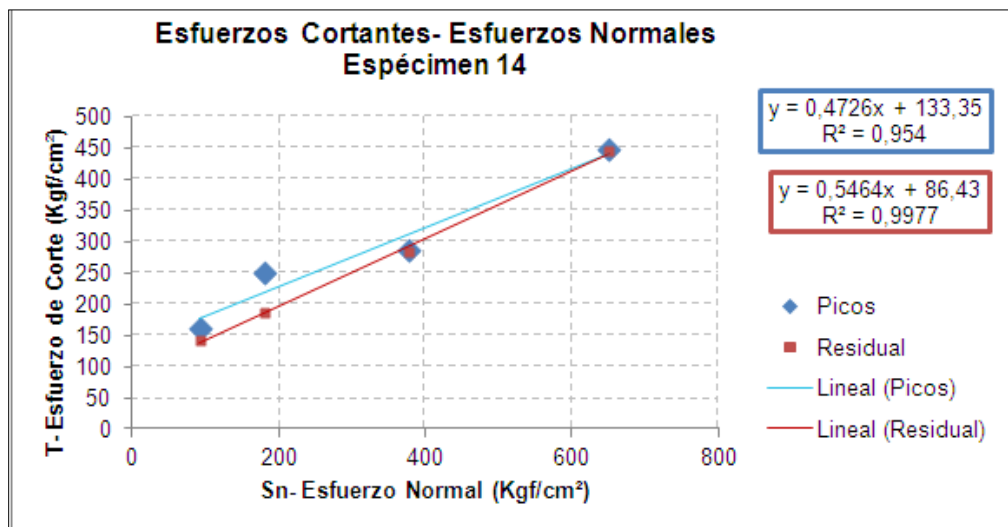


Figura 142 Tendencias de Esfuerzos de Corte-Esfuerzos Normales. Espécimen 14. Elaboración propia.

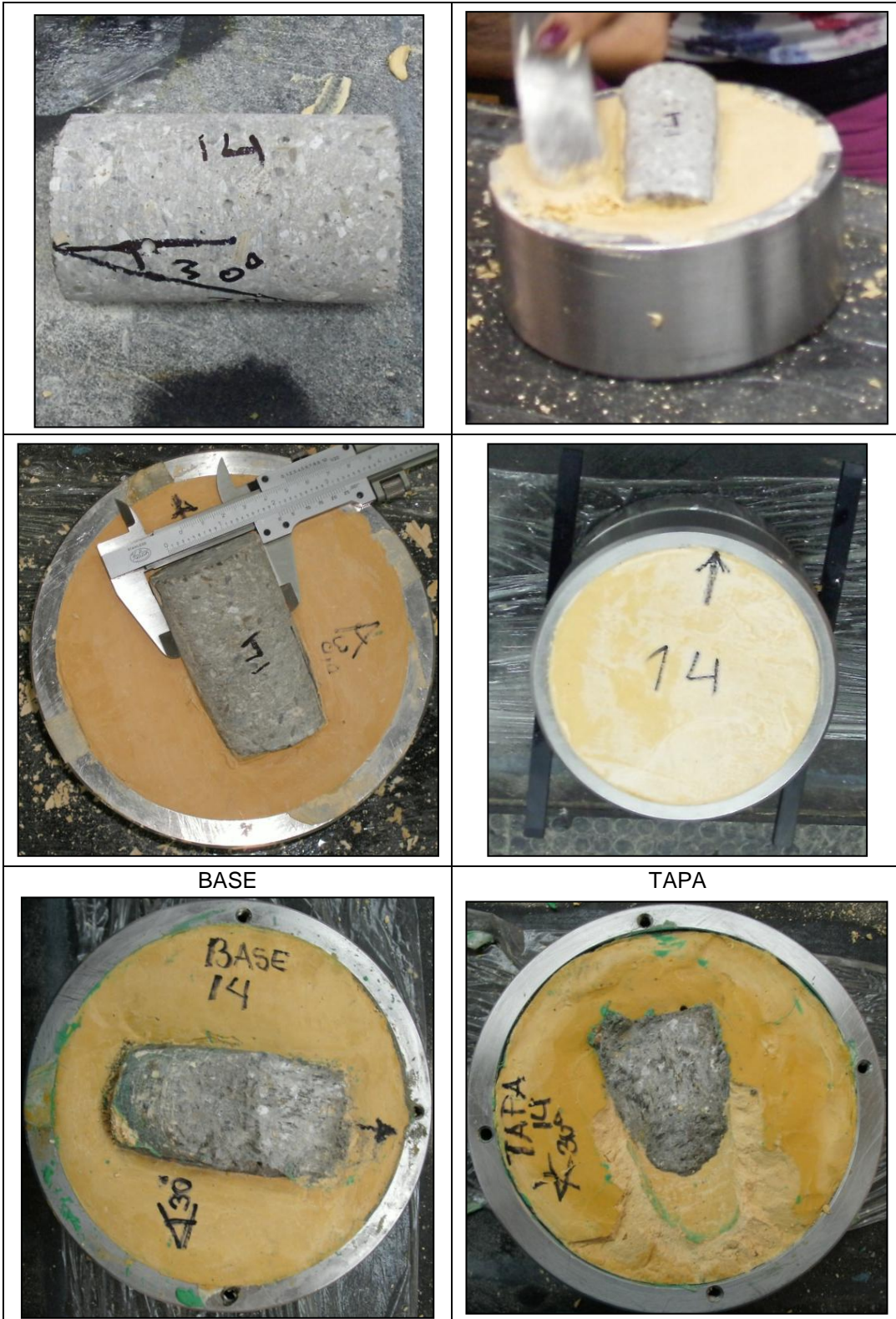


Figura 143 Ensayo de Corte Directo, espécimen 14. Elaboración propia.



## ESPÉCIMEN 15

Tabla 87 Datos del espécimen 15. Ensayo de Corte Directo. Elaboración propia

Espécimen: 15	
Descripción	
Tipo:	Cilíndrica
Altura:	88,05 (mm)
Diámetro:	51,25 (mm)
Área de la superficie cortante: Elíptica	
Ángulo de inclinación de la vertical: 45°	

Tabla 88 Esfuerzos pico y residuales. Espécimen 15 en sus 4 etapas. Elaboración propia

ESPECIFICACIONES		Max(Pico)		Final (Residual)	
		Sn	T	Sn	T
		Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Espécimen 15	Etapa 1	72,72	132,56	72,42	102,00
Espécimen 15	Etapa 2	151,65	129,23	151,49	115,56
Espécimen 15	Etapa 3	321,31	195,73	321,31	194,11
Espécimen 15	Etapa 4	493,48	264,20	493,48	264,14

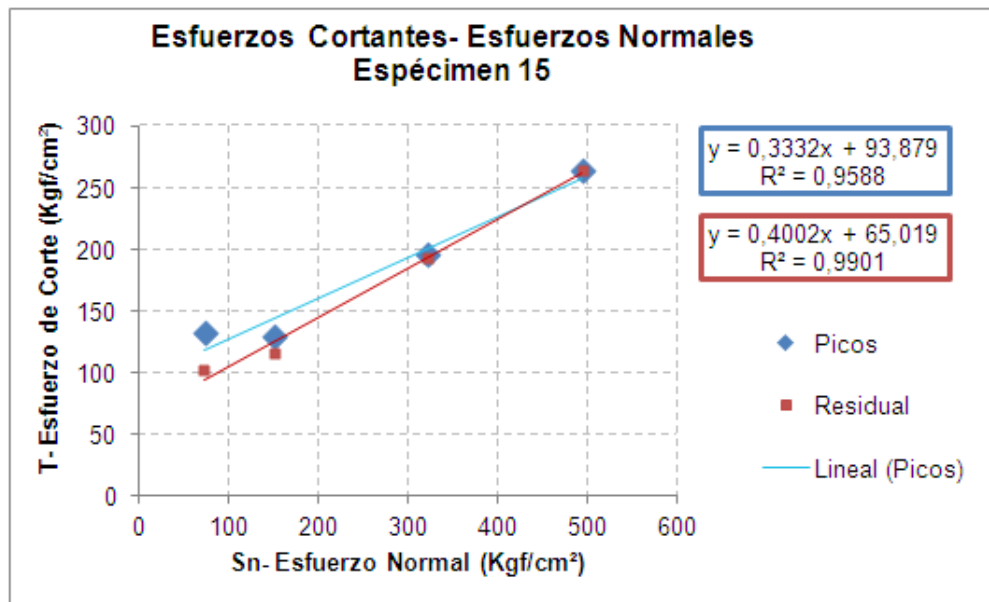
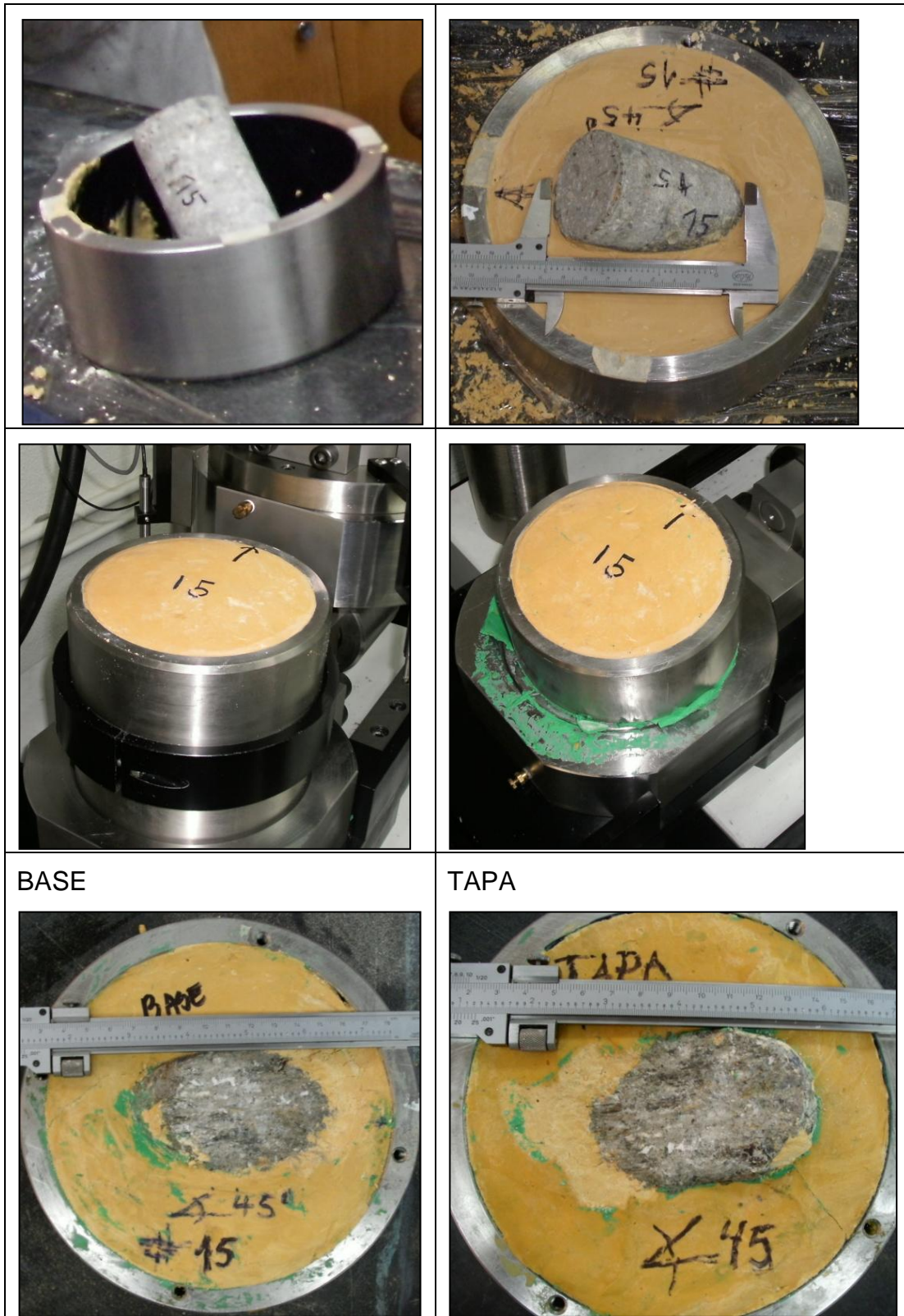


Figura 144 Tendencias de Esfuerzos de Corte-Esfuerzos Normales. Espécimen 15. Elaboración propia.



BASE

TAPA

Figura 145 Ensayo de Corte Directo, espécimen 15. Elaboración propia.

#### IV.8.2 Ángulos de Fricción y valor de la Cohesión para cada espécimen a partir de las líneas de tendencia de sus esfuerzos

Tabla 89 Ensayo de corte. Ecuación de la recta q caracteriza la tendencia de los esfuerzos. Elaboración propia

Espécimen	Ecuación de la recta	
	Pico	Residual
11	$y = 0,3197x + 93,608$	$y = 0,3788x + 56,867$
12	$y = 0,418x + 46,767$	$y = 0,306x + 28,941$
13A	$y = 0,2738x + 108,95$	$y = 0,3142x + 50,262$
13B	$y = 0,3063x + 72,867$	$y = 0,3621x + 37,306$
14	$y = 0,4726x + 133,35$	$y = 0,5464x + 86,43$
15	$y = 0,3332x + 93,879$	$y = 0,4002x + 65,019$

Tabla 90 Ensayo de corte. Ángulo de fricción y valor de la cohesión. Elaboración propia.

			Pico	Residual	
Ángulo de inclinación del Espécimen	90°	Espécimen 11	Cohesión	93,61	56,87
			Ángulo de fricción	17,73	20,75
	60°	Espécimen 12	Cohesión	46,77	28,94
			Ángulo de fricción	22,68	17,01
	0°	Espécimen 13A	Cohesión	108,95	50,26
			Ángulo de fricción	15,31	17,44
	0°	Espécimen 13B	Cohesión	72,87	37,31
			Ángulo de fricción	17,03	19,91
	30°	Espécimen 14	Cohesión	133,35	86,43
			Ángulo de fricción	25,30	28,65
	45°	Espécimen 15	Cohesión	93,88	65,02
			Ángulo de fricción	18,43	21,81

<sup>6</sup> Cohesión medida en kgf/cm<sup>2</sup>. Ángulo de fricción medido en grados °

### IV.8.3 Tendencia de Esfuerzos para todas las Etapas y Especímenes

Tabla 91: Tendencia de Esfuerzos picos y residuales para todas las Etapas y Especímenes. Ensayo de Corte Directo Elaboración propia.

ESPECIFICACIONES		Max(Pico)		Final (Residual)	
		Sn	T	Sn	T
		Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Espécimen 11	Etapa 1	106,12	168,17	106,12	119,10
Espécimen 12	Etapa 1	53,07	79,56	52,99	41,24
Espécimen 13A	Etapa 1	109,18	136,02	109,05	73,47
Espécimen 13B	Etapa 1	99,10	126,59	97,92	81,99
Espécimen 14	Etapa 1	92,28	162,58	92,24	141,06
Espécimen 15	Etapa 1	72,73	132,56	72,42	102,00
Espécimen 11	Etapa 2	217,09	131,05	216,41	126,39
Espécimen 12	Etapa 2	112,06	78,86	112,06	66,04
Espécimen 13A	Etapa 2	364,78	217,95	364,78	200,87
Espécimen 13B	Etapa 2	208,34	114,47	208,34	100,42
Espécimen 14	Etapa 2	181,92	251,50	181,65	186,02
Espécimen 15	Etapa 2	151,65	129,23	151,49	115,56
Espécimen 11	Etapa 3	442,42	200,58	442,25	196,39
Espécimen 12	Etapa 3	237,99	149,65	237,32	105,19
Espécimen 13A	Etapa 3	479,99	234,10	478,18	175,58
Espécimen 13B	Etapa 3	428,79	194,70	428,76	194,70
Espécimen 14	Etapa 3	378,18	286,19	378,06	283,80
Espécimen 15	Etapa 3	321,31	195,73	321,31	194,11
Espécimen 11	Etapa 4	692,79	340,91	692,50	337,53
Espécimen 12	Etapa 4	384,91	208,37	383,04	143,62
Espécimen 13A	Etapa 4	*7	*	*	*
Espécimen 13B	Etapa 4	767,29	316,16	767,29	316,16
Espécimen 14	Etapa 4	650,81	449,01	650,81	446,71
Espécimen 15	Etapa 4	493,48	264,20	493,48	264,14

(\*) Etapa 4 No efectuada motivado a que la muestra fallo antes de su última etapa <sup>7</sup>

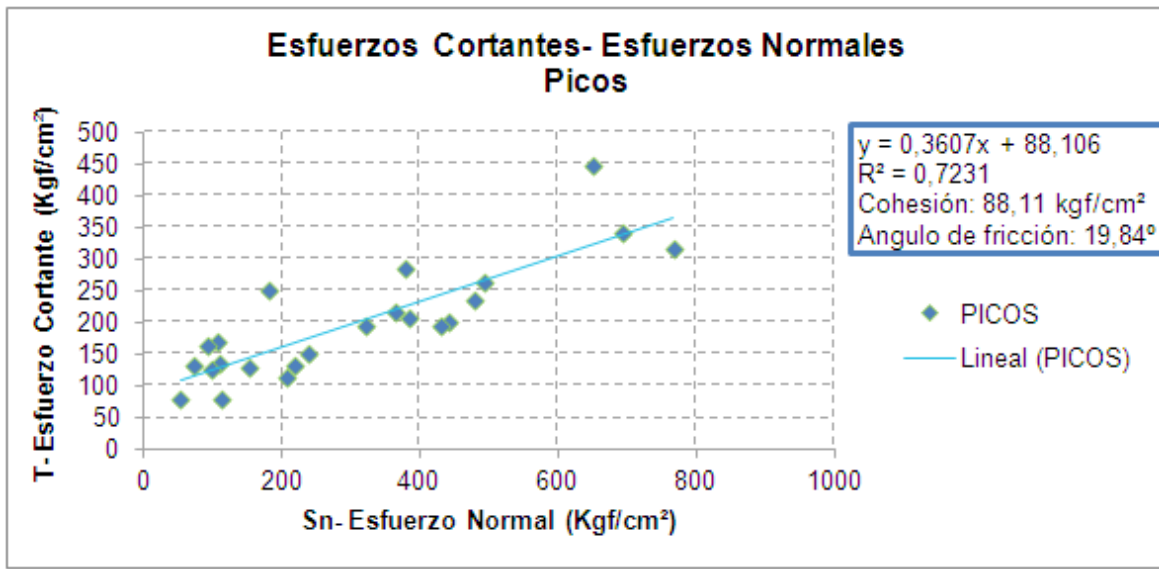


Figura 146 Tendencias de Esfuerzos de Corte-Esfuerzos Normales (valores pico), Todos los especímenes. Ensayo de Corte Directo. Elaboración propia

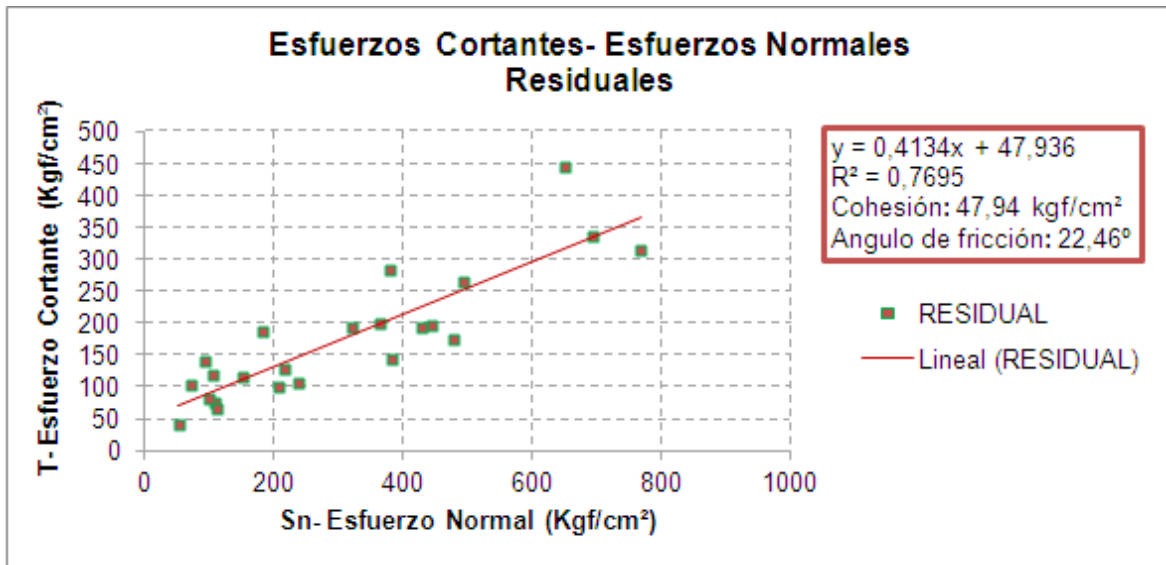


Figura 147 Tendencias de Esfuerzos de Corte-Esfuerzos Normales (valores Residuales), Todos los especímenes. Ensayo de Corte Directo. Elaboración propia.

Con base en el análisis de tendencia anterior se obtiene que el ángulo de fricción es de 19.48 grados y la cohesión es de 88 kg/cm<sup>2</sup>. Adicionalmente se obtiene el residual del ángulo de fricción que es de 22.46 grados y de la cohesión es de 48 kg/cm<sup>2</sup>.

Los valores establecidos como referenciales corresponden a materiales con un ángulo de fricción mayor a 15 grados y una cohesión superior a los 20 Kg/cm<sup>2</sup>,

para establecer un material de características similares a una roca meteorizada. Los valores obtenidos reflejan que se está por encima de los valores recomendados en el material propuesto.

Con base en los resultados se observa que es importante ensayar en los distintos planos posibles de falla para obtener valores más ajustados a un comportamiento real del material.

#### IV.9 ENSAYO DE PULSO ULTRASÓNICO PARA ESPECÍMENES NO ENSAYADOS

Se realizó el ensayo de ultrasonido (ondas P) mediante equipo denominado ciego o de umbral fijo, se estableció este ensayo como valor de referencia para los ensayos de fatiga acelerada donde se mide el ultrasonido en cada etapa.

Tabla 92 Datos de los especímenes utilizados para el Ensayo de Pulso Ultrasónico. Elaboración propia

	Especímen 1	Especímen 2	Especímen 3	Especímen 4
Altura (m)	0,133	0,133	0,131	0,135
Diámetro (m)	0,050	0,051	0,051	0,051
Área	0,002	0,002	0,002	0,002
Peso (kg)	0,615	0,609	0,599	0,605
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,000262	0,000273	0,000268	0,000277
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2351,48	2232,40	2234,70	2186,81
Densidad Promedio (kg/m <sup>3</sup> )	2237,61			

Tabla 93 Velocidades obtenidas con el Ensayo de Pulso Ultrasónico. Elaboración propia

Especímen	Tiempo		Altura		Velocidad	Velocidad Promedio
	µs	s	cm	m	m/s	
1	34,0	0,000034	13,32	0,1332	3917,65	3878,10
2	34,4	0,000034	13,25	0,1325	3851,74	
3	34,1	0,000034	13,07	0,1307	3832,84	
4	34,5	0,000035	13,49	0,1349	3910,14	

Los valores obtenidos corresponden a una velocidad promedio de 3878 m/s con una desviación estándar de 42 m/s lo cual es indicativo de que el material es homogéneo (desviación menor a 100 m/s) y de buena calidad, según Manual del Concreto Estructural (Porrero y colaboradores).

#### **IV.10 ENSAYO LOCATI CON ULTRASONIDO EN TIEMPOS DE ESPERA A CARGA CONSTANTE**

Este ensayo es una variante del ensayo de LOCATI la cual permite realizar medidas de ultrasonido en el seno del material (ondas P) y en la superficie del mismo (ondas S) para ver si el microconcreto se está degradando. La programación del ensayo conto con 61 fases de ejecución, constituidas por tres etapas.

En la primera etapa denominada Espera, se realizan las medidas de pulso ultrasónico y a su vez el espécimen se mantiene sometido a carga constante. Esta etapa fue programada para finalizar de forma manual dándole paso a la siguiente fase.

La segunda etapa comienza después de realizadas las medidas con el equipo de pulso ultrasónico y se denomina Rampa, programada para generar periodos de incrementos de carga con un tiempo estipulado de 30s, para ser en total 15 rampas de incremento de cargas.

La tercera rampa denominada LOCATI, fase durante la cual se establecieron 1000 ciclos de carga y descarga con frecuencia constante de 5Hz y de amplitud variable, iniciando con una amplitud de 11 kN con incrementos en cada una de ellas de 3kN hasta cumplir las 15 etapas LOCATI o hasta la ocurrencia de falla.

## ESPÉCIMEN 1

Tabla 94 Datos del espécimen 1 ensayado con método LOCATI y mediciones de velocidades de pulso ultrasónico en tiempos de espera a carga constante. Elaboración propia

Espécimen 1	
Datos del Espécimen	
Altura	132,20 mm
Diámetro	51,20 mm
Área	20,59 cm <sup>2</sup>
Volumen	272,18 cm <sup>3</sup>
Peso	611,00 g

Tabla 95 Resultados obtenidos. Espécimen 1, ensayado con método LOCATI y mediciones de velocidades de pulso ultrasónico en tiempos de espera a carga constante. Elaboración propia

Resultados obtenidos			
Duración (s)			
5589,9			
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	7427,98	Max	1,56
Min	269,40	Min	0,00
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	2,57	Max	359,52
Min	0,00	Min	11,67

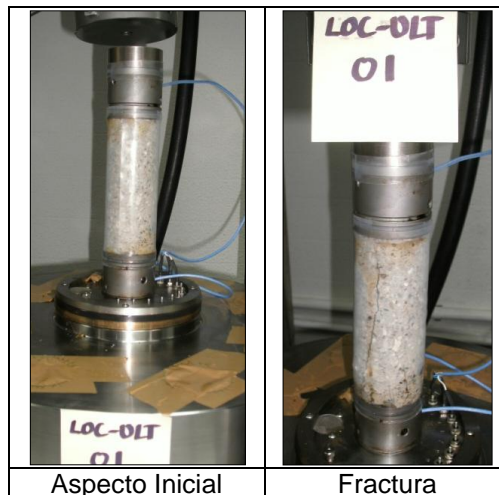


Figura 148 Espécimen 1. Ensayo LOCATI con Ultrasonido en tiempos de espera a carga constante. Elaboración propia



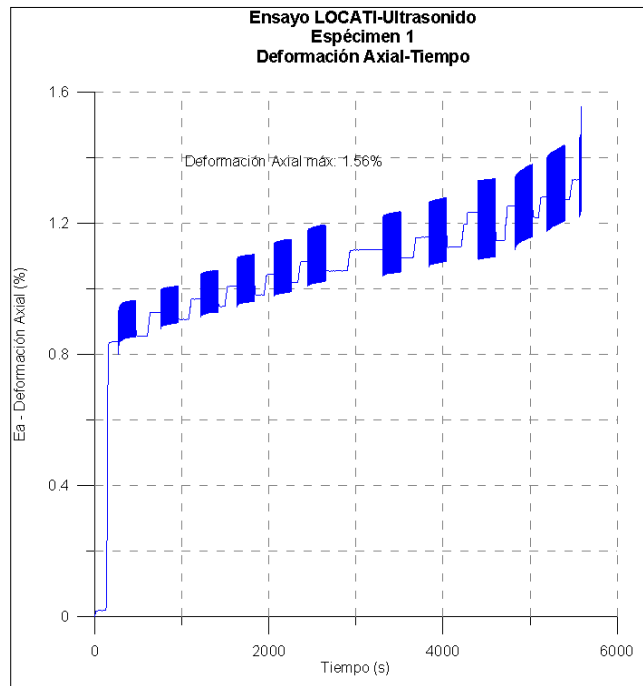


Figura 149 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

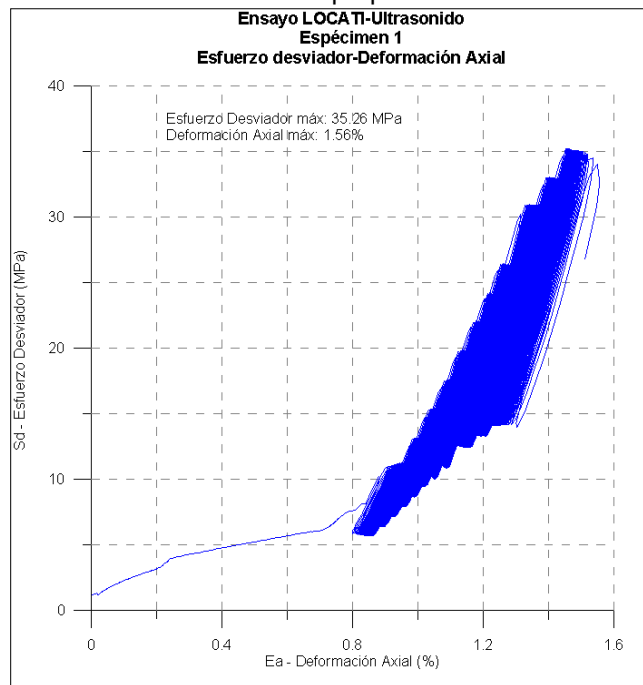


Figura 150 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

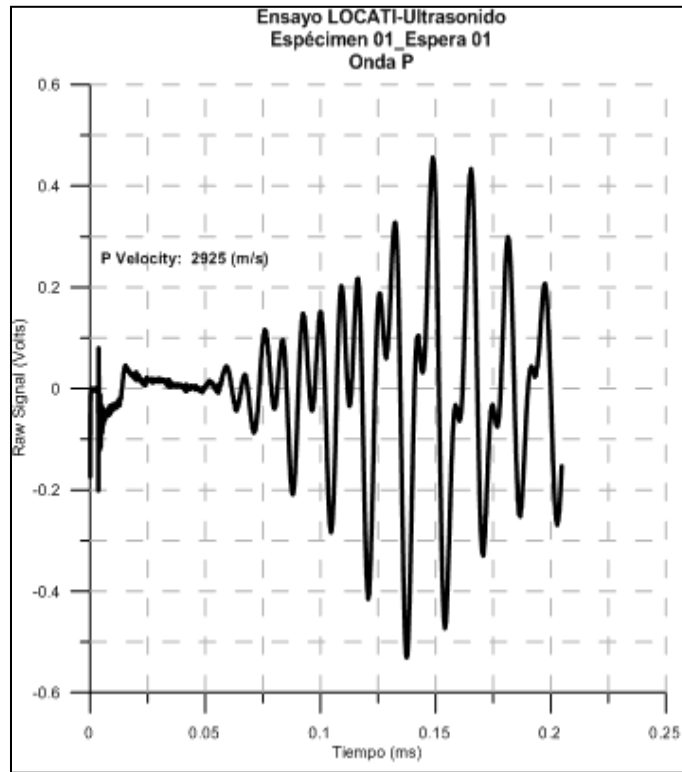


Figura 151 Onda P, espécimen 1\_espera 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

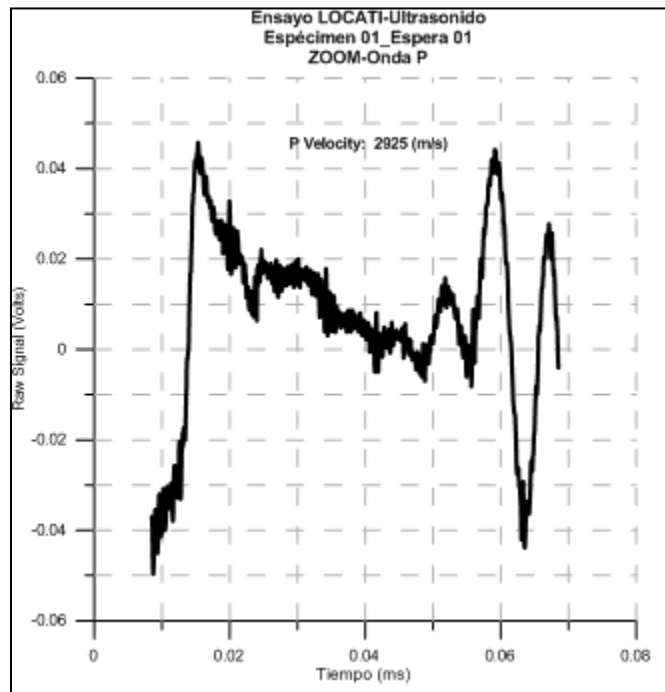


Figura 152 ZOOM\_Onda P, espécimen 1\_espera 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

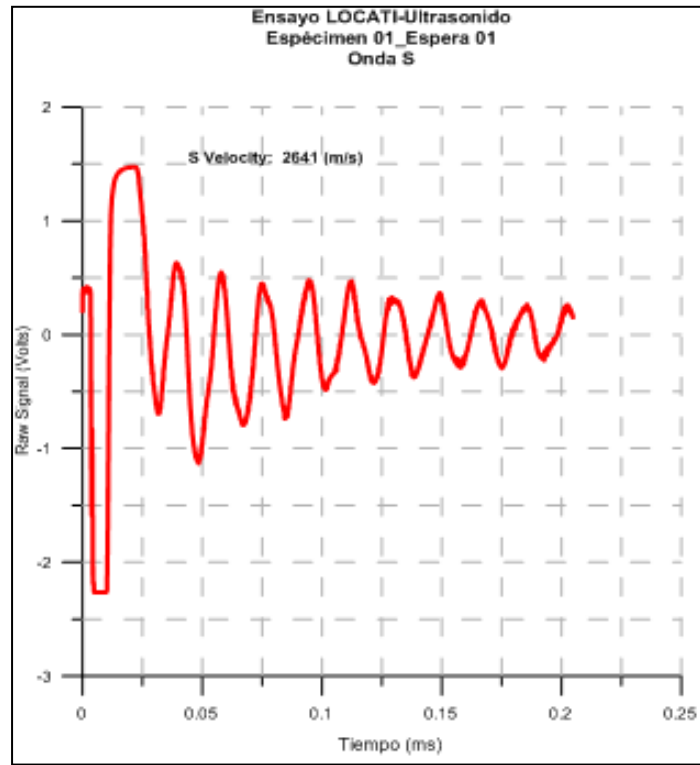


Figura 153 Onda S, espécimen 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

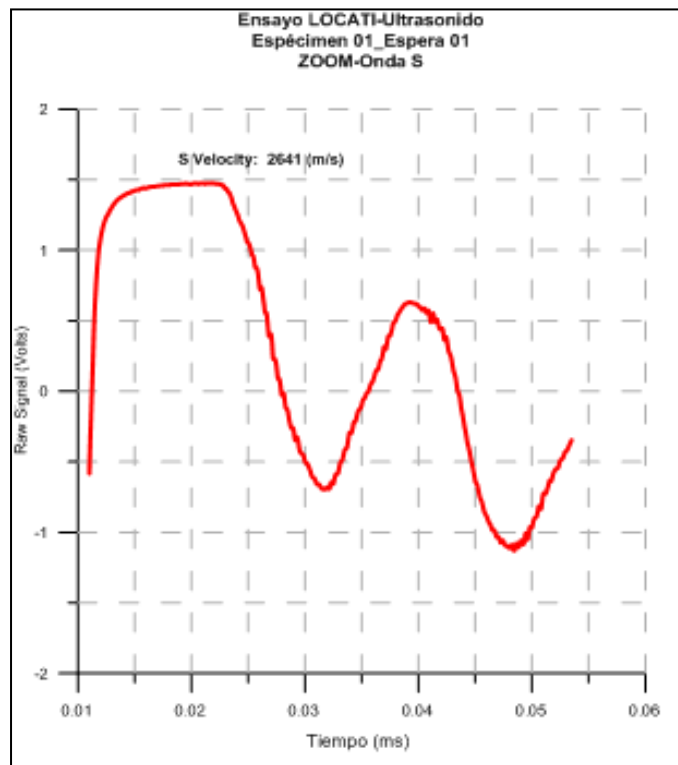


Figura 154 ZOOM\_ Onda S, espécimen 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

#### IV.10.1 Resumen de Velocidades de Ondas P y S en todas las etapas de espera durante la ejecución del Ensayo LOCATI para el espécimen 1

Tabla 96 Valores de las velocidades obtenidas en cada etapa de espera durante el ensayo Locati para el espécimen 1. Elaboración propia

	ONDAS P (m/s)	ONDAS S (m/s)
ESPERA 1	2925	2641
ESPERA2*	2956	2626
ESPERA3*	2941	2611
ESPERA4*	2956	2626
ESPERA5*	2934	2611
ESPERA6*	2949	2626
ESPERA7*	2949	2611
ESPERA8*	2952	2611
ESPERA9*	2936	2641
ESPERA10*	2952	2611
ESPERA11*	2921	2626
ESPERA12*	2943	2626
ESPERA13*	2941	2607
ESPERA14*	2954	2603
ESPERA15*	2926	2611
ESPERA16*	2915	2629
ESPERA17*	2904	2626
ESPERA18*	2912	2619
ESPERA19*	2888	2611
ESPERA20*	2939	2611
ESPERA21*	2893	2611
ESPERA22*	2915	2641
ESPERA23*	2875	2611
ESPERA24*	2912	2626

8

---

<sup>8</sup> (\*) Las Figuras correspondientes a la espera se puede ver en el Apéndice I.1

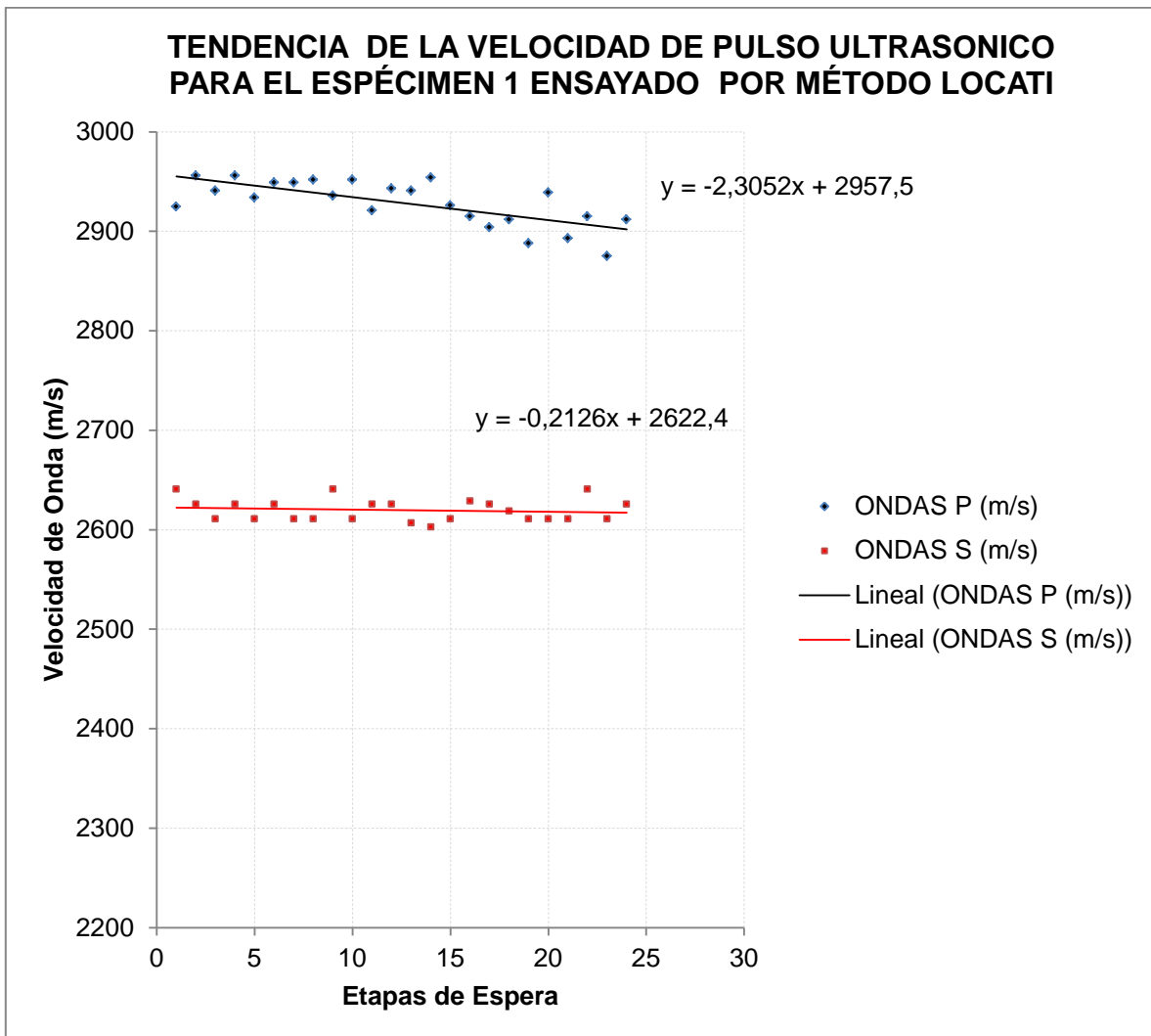


Figura 155 Tendencias de las velocidades de pulso ultrasónico para el espécimen 1 ensayado por método LOCATI. Elaboración propia.

## ESPÉCIMEN 2

Tabla 97 Datos del espécimen 2 ensayado con método LOCATI y mediciones de velocidades de pulso ultrasónico en tiempos de espera a carga constante. Elaboración propia

Espécimen 2	
Datos del Espécimen	
Altura	133,0 mm
Diámetro	52,0 mm
Área	21,24 cm <sup>2</sup>
Volumen	282,45 cm <sup>3</sup>
Peso	622,00 g

Tabla 98 Resultados obtenidos. Espécimen 2, ensayado con método LOCATI y mediciones de velocidades de pulso ultrasónico en tiempos de espera a carga constante. Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS			
Duración (s)			
5716,6			
Carga Axial (kgf)		Deformación Axial (%)	
Max	7420,20	Max	1,41
Min	266,40	Min	0,00
Desplazamiento Axial(mm)		Esfuerzo Desviador (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Max	2,61	Max	347,97
Min	0,00	Min	11,10

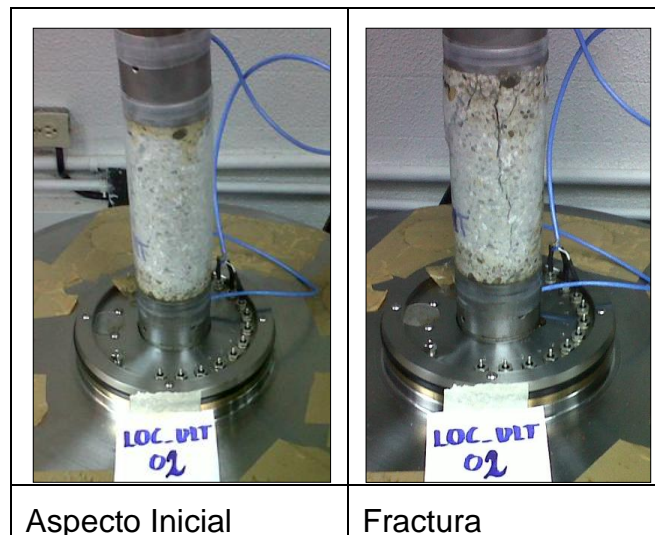


Figura 156 Espécimen 2. Ensayo LOCATI con Ultrasonido en tiempos de espera a carga constante. Elaboración propia

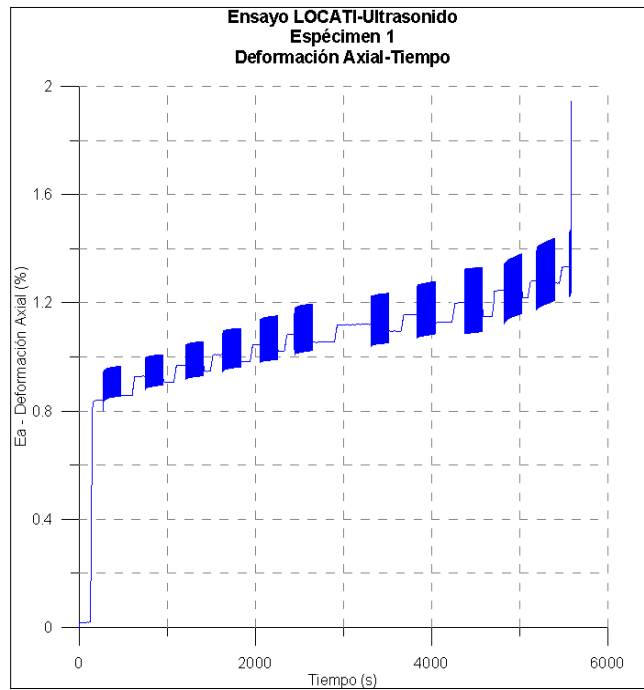


Figura 157 Deformación Axial-Tiempo. Especimen 2. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

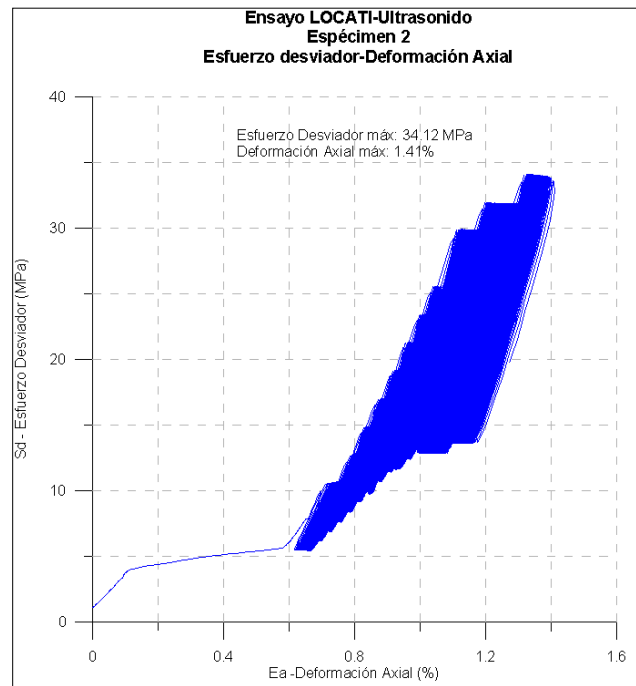


Figura 158 Esfuerzo Desviador-Deformación Axial. Especimen 2. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

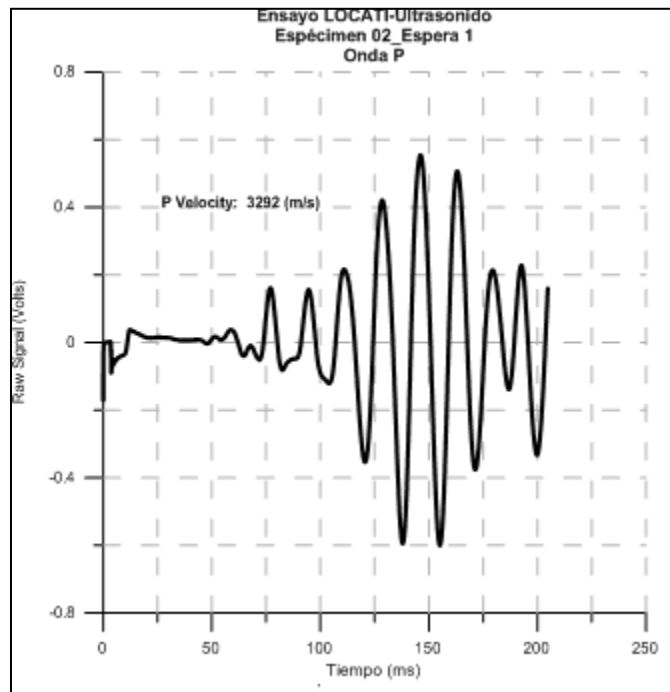


Figura 159 Onda P, espécimen 2\_espera 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

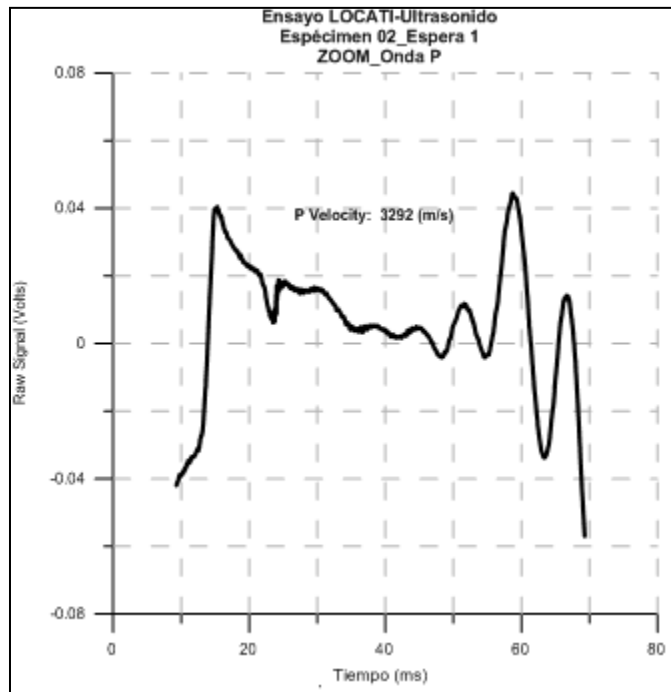


Figura 160 ZOOM\_Onda P, espécimen 2\_espera 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia



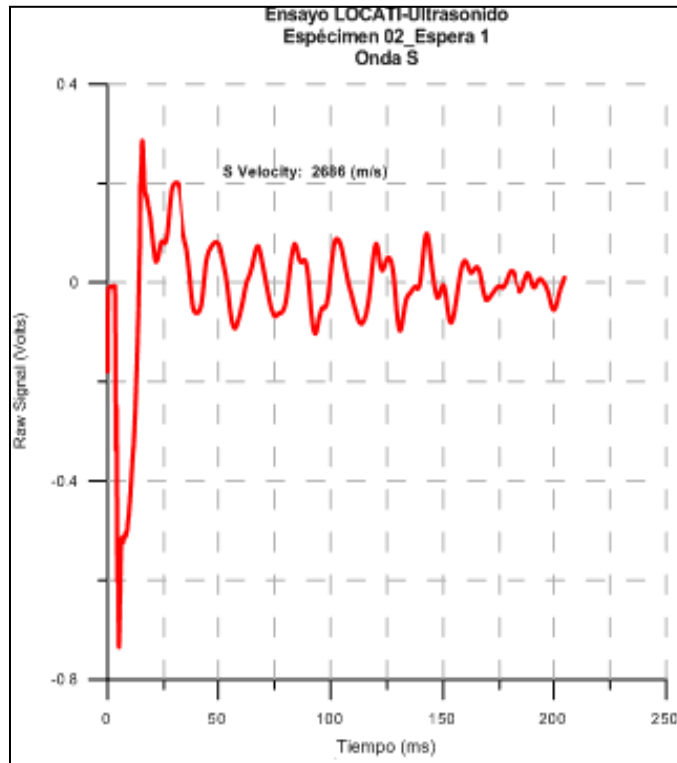


Figura 161 Onda S, espécimen 2\_espera 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

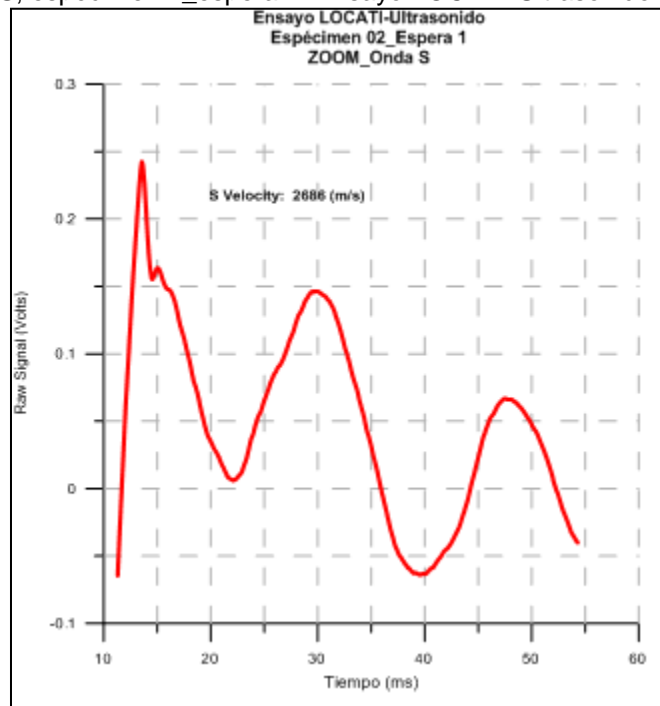


Figura 162 ZOOM\_Onda S, espécimen 2\_espera 1. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia.

#### IV.10.2 Resumen de Velocidades de Ondas P y S en todas las etapas de espera durante la ejecución del Ensayo LOCATI para el espécimen 2

Tabla 99 Valores de las velocidades obtenidas en cada etapa de espera durante el ensayo Locati para el espécimen 2. Elaboración propia

	ONDAS P (m/s)	ONDAS S (m/s)
ESPERA 1	3292	2686
ESPERA2*	3283	2627
ESPERA3*	3221	2673
ESPERA4*	3236	2657
ESPERA5*	3292	2627
ESPERA6*	3259	2704
ESPERA7*	3221	2673
ESPERA8*	3255	2657
ESPERA9*	3213	2686
ESPERA10*	3236	2657
ESPERA11*	3259	2657
ESPERA12*	3236	2641
ESPERA13*	3259	2627
ESPERA14*	3259	2642
ESPERA15*	3283	2673
ESPERA16*	3259	2612
ESPERA17*	3213	2660
ESPERA18*	3283	2673
ESPERA19*	3213	2627
ESPERA20*	3259	2657
ESPERA21*	3213	2612
ESPERA22*	3236	2627
ESPERA23*	3190	2627
ESPERA24*	3190	2612

9

<sup>9</sup> Las figuras correspondientes a la espera se puede ver en el Apéndice I.2

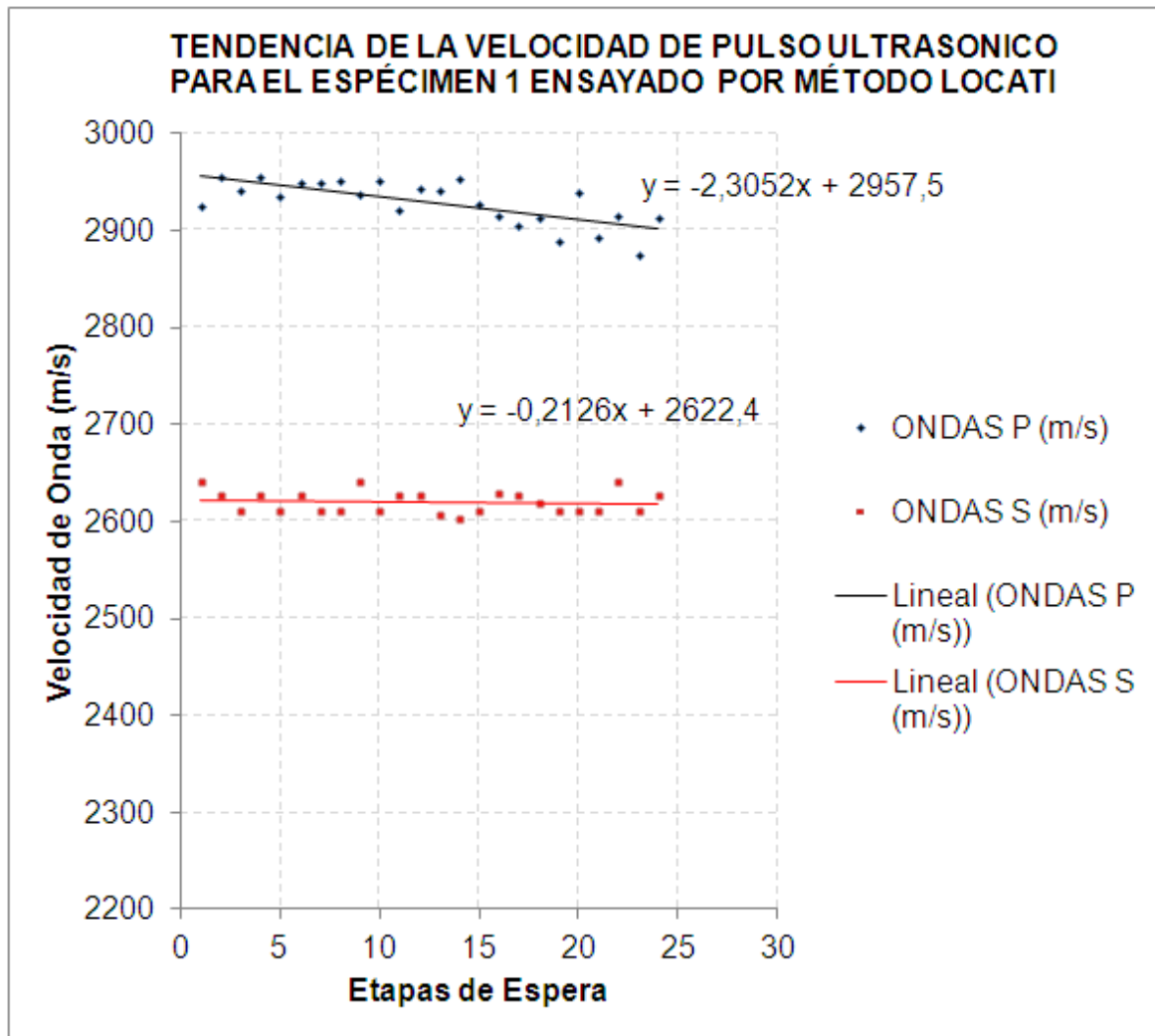


Figura 163 Tendencias de las velocidades de pulso ultrasónico para el espécimen 2 ensayado por método LOCATI. Elaboración propia

Con base en los resultados ensayados bajo la modalidad del Método de LOCATI con la medida de ultrasonido tenemos:

Se presenta una degradación de la onda en el seno del material (onda P) que es menor al 5% del valor inicial de referencia, sin embargo, hay una fluctuación marcada cuando se carga la muestra que tiende a ser mayor la velocidad y después de ser sometida a ciclos de carga, donde baja la velocidad.

Al igual que el caso anterior se presenta una degradación de la onda superficial (onda S) que es menor del valor inicial de referencia, sin embargo, hay una fluctuación menor cuando se carga la muestra que tiende a ser mayor la velocidad

y después de ser sometida a ciclos de carga, donde baja la velocidad.

Se observa que el tiempo de espera para la lectura de ultrasonido permite la recuperación parcial y redistribución de esfuerzos en la muestra de la muestra

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### V.1 CONCLUSIONES

Con base en los resultados y los análisis realizados en este Trabajo Especial de Grado podemos concluir:

Las curvas típicas de tensión-deformación del microconcreto corresponden a un modelo equivalente de curva tensión-deformación de concreto, con una etapa de carga lineal, una zona de plastificación, un límite máximo y una zona de falla, se determinó para el material propuesto un valor de  $320 \text{ kg/cm}^2$  con una desviación estándar de  $42 \text{ Kg/cm}^2$ .

La resistencia a corte del microconcreto en estado confinado varía dependiendo del plano de falla que se evalúe (distintos ángulos de colocación de las muestras), para el diseño propuesto es equivalente a una roca meteorizada, estando en el orden del 28 % de la resistencia en compresión.

Con base en el análisis de tendencia anterior se obtiene que el ángulo de fricción es de 19.48 grados y la cohesión es de  $88 \text{ kg/cm}^2$ . Adicionalmente se obtiene el residual del ángulo de fricción que es de 22.46 grados y de la cohesión es de  $48 \text{ kg/cm}^2$ .

La resistencia a tracción del microconcreto está en el orden del 10% del valor de resistencia a la compresión, valor similar al del concreto normal.

La velocidad de pulso ultrasónico en probetas de microconcreto sin someterla a carga corresponde a un concreto que se puede considerar de calidad buena y homogéneo. Esta medida permite establecer zonas de homogeneidad en sitio y valores referenciales de resistencia.

La velocidad de pulso ultrasónico en probetas de microconcreto sometida a estados de carga en compresión estática aumenta la velocidad de la onda P pero mantiene la velocidad de la onda S prácticamente igual.

La velocidad de pulso ultrasónico en probetas de microconcreto sometida a estados de carga cíclico tiene una tendencia a disminuir Tanto en onda P como en onda S, pero en variaciones menores del 5%, lo cual no permitiría servir como medida de control de daño.

El diseño de microconcreto permite establecer una mejora al combinar distintos agregados finos (arena y arcillo) para mejorar la resistencia mecánica de los mismos.

El nuevo diseño de microconcreto permite un mejor comportamiento a fatiga, ya que desde el tercer día tiene mayor competencia que la lechada de referencia y con el tiempo se mantiene estable para niveles de esfuerzos cíclicos cercanos a la falla.

Se caracterizó el comportamiento de la propuesta de microconcreto utilizado para la inyección de túneles de líneas de transporte subterráneo, obteniendo un comportamiento que supera ampliamente las especificaciones dadas y las capacidades de la lechada de inyección que se utiliza actualmente.

## **V.2 RECOMENDACIONES**

Realizar un estudio con arena como agregado únicamente, de forma de verificar el comportamiento de los morteros en esta condición.

Realizar estudios de fatiga para otras condiciones de carga, una condición posible es la asociada a impactos frecuentes que corresponde a una onda cuadrada.

Realizar estudios de fatiga completos, generando la secuencia para cada escalón de esfuerzo hasta la falla, para contrastar con los ensayos acelerados de fatiga.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Abdev, I., & Blanco Posse, O. (2002). Estudio de la exudación y la retracción en el microconcreto para la reparación de estructuras de concreto armado. Tesis, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Boada, M. D., & Pérez, E. (2011). Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3,5MP para pavimento con adición de fibras plásticas. Tesis, Pontificia Universidad JAVERIANA, Bogotá D.C.
- Carlos, T. (2010). Determinación del límite de fatiga de hormigones reciclados. Universidad de Cantabria, Laboratorio de la investigación de ciencias e ingeniería de los materiales. Cantabria: LADICIM.
- Carrascal, I., Casado, J. A., Diego, S., & Polanco, J. A. Estimación de las condiciones críticas de un compuesto de poliamida y fibra de vidrio por medio de un ensayo de fatiga acelerada (LOCATI) a partir de la medida del daño neto. Universidad de Cantabria: Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales.
- Caviedes, J. L. (2005). Tecnología de concreto.
- Hernández A, M. A., & Martínez O, R. (2008). Análisis de los parámetros geomecánicos en la excavación del túnel trasvase Taguaiguay-Valle de Tucutunemo, Estado Aragua. Progresivas 0+000-0+200. Tesis, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Hoek, E., Carranza Torres, C., & Corkum, B. (2002). El criterio de rotura de Hoek-Brown. Edición 2002.
- Locati, L. (1950). La fatica dei materiali metallici. Milano: Ulrico Hoepli.
- Locati, L. (1952). Programmed fatigue test, variable amplitude rotat. Metallurgia Italiana.
- Melentijevic, S. (2005). Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineal y leyes de fluencia no asociadas. Tesis Doctoral .

- Norma, COVENIN 1753. (1987). Estructuras de concreto armado para edificaciones análisis y diseño. Caracas.
- NORMA, COVENIN 255. (1998). Agregados. Determinación de la composición granulométrica. Caracas.
- NORMA, COVENIN 263. (1978). Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado. Caracas.
- NORMA, COVENIN 268. (1998). Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción. Caracas.
- NORMA, COVENIN 268. (1998). Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción. Caracas.
- NORMA, COVENIN 273. (1998). Concreto, mortero y componentes. Terminología. Caracas.
- NORMA, COVENIN 277. (200). Concreto. Agregados. Requisitos. Caracas.
- NORMA, COVENIN 337. (1978). Definiciones y terminología relativa al concreto. Caracas.
- NORMA, COVENIN 338. (1994). Método de elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto. Caracas.
- NORMA, COVENIN 339. (2003). Concreto. Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams. Caracas.
- NORMA, COVENIN 341. (1979). Método de ensayo para determinar la tracción indirecta del concreto usando probetas cilíndricas. Caracas.
- NORMA, COVENIN 345. (1980). Método para la extracción de probetas cilíndricas y viguetas de concreto endurecido. Caracas.
- NORMA, COVENIN 354. (2001). Método de mezclado de concreto en laboratorio. Caracas.
- Perles, P. (2005). Hormigón Armado. Buenos Aires: 1ª Edición.
- Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & Velazco, G. J. (2009). Manual del concreto



estructura. Caracas: Impresos Minipres, C.A.

Puell, F. (2004). La linealización del criterio de Hoek-Browm en el análisis de la estabilidad general de taludes en roca. *Revista de Obras Públicas* , 37-44.

RocLab. (2004). Guía de usuario. Análisis de la resistencia del macizo rocoso mediante el criterio de rotura de Hoek&Browm. Rocscience Inc.

Serrano Mitre Valdivia, R. C. (2006). Estudio de fatiga de pavimentos rígidos, mediante determinación de la resistencia cíclica de probetas cilíndricas de hormigón cargadas transversalmente. Chile: Universidad Austral de Chile.

Vadiola, B. (2004). Recuperado el 23 de Enero de 2012, de [http://www.imac.unavarra.es/web\\_imac/pages/docencia/assignaturas/mquinas-iti/Apunteak/Cap4.pdf](http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/assignaturas/mquinas-iti/Apunteak/Cap4.pdf)

## APENDICE

### APENDICE I:

#### I.1 Ondas de ultrasonido del ensayo LOCATI con ultrasonido en tiempos de espera a carga constante

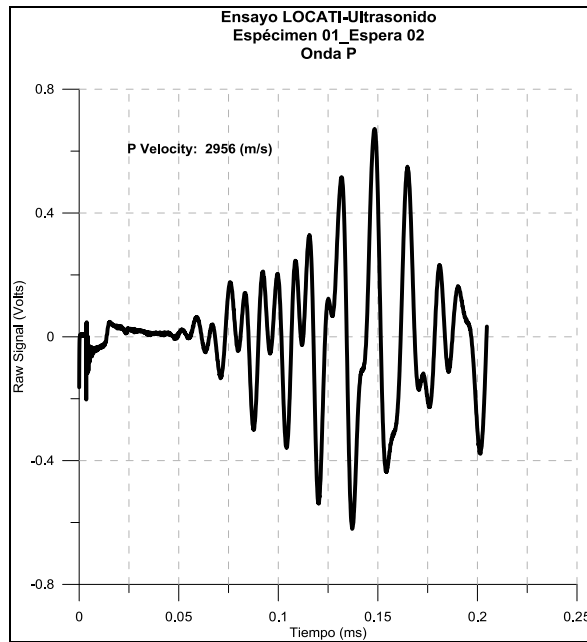


Figura 164 Onda P, espécimen 1\_espera 2. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

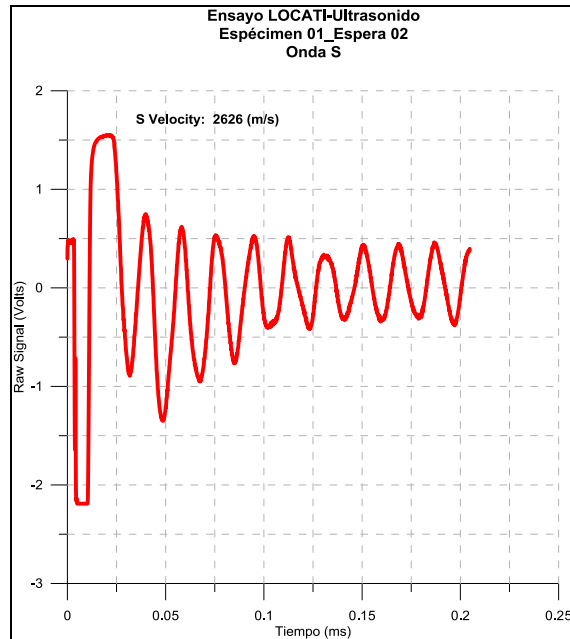


Figura 165 Onda S, espécimen 1\_espera 2. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

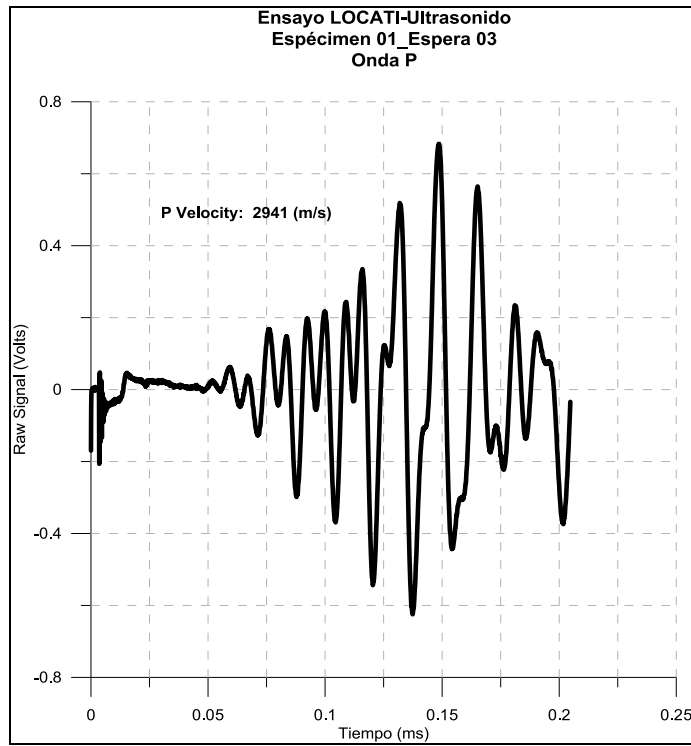


Figura 166 Onda P, espécimen 1\_espera 3. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

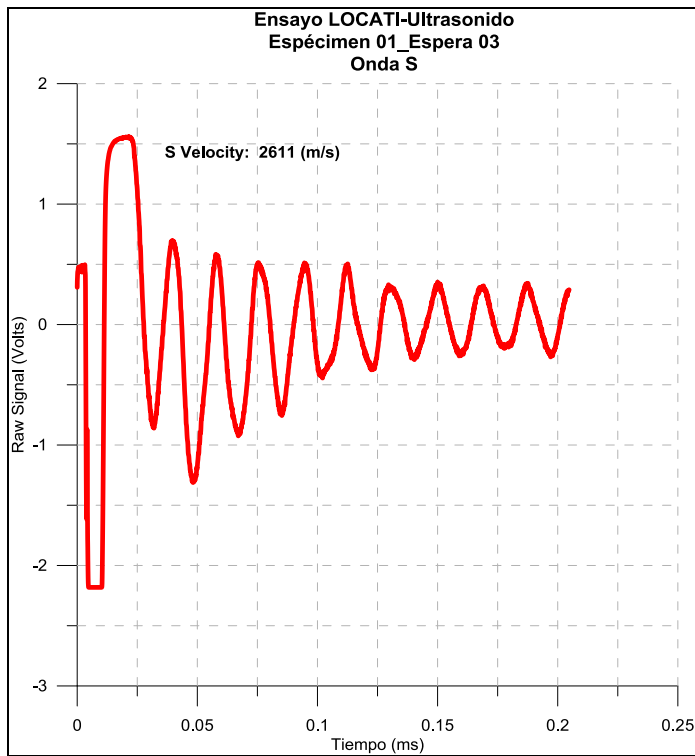


Figura 167 Onda S, espécimen 1\_espera 3. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

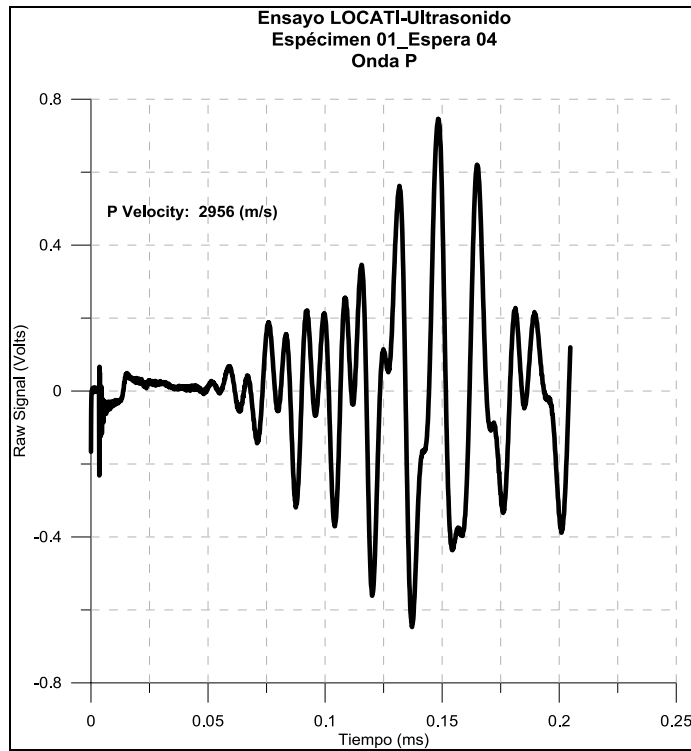


Figura 168 Onda P, espécimen 1\_espera 4. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

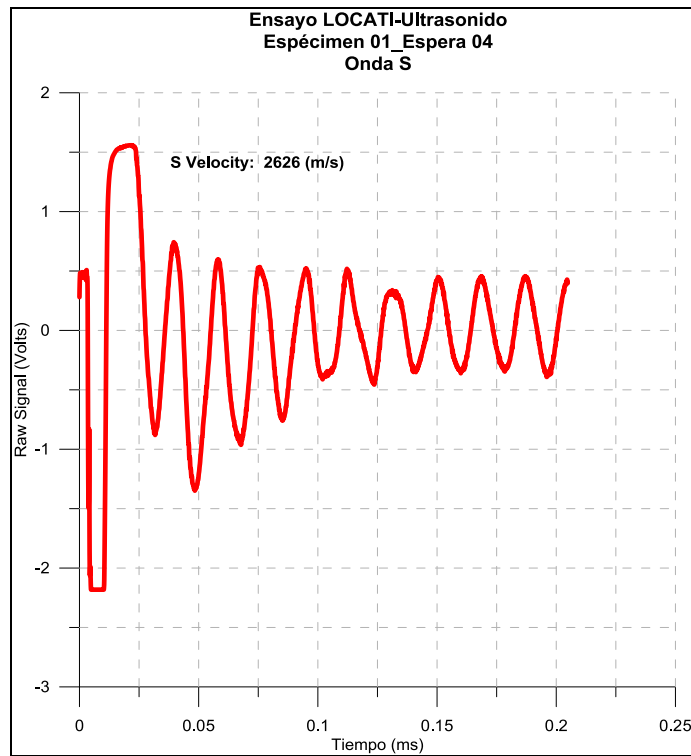


Figura 169 Onda S, espécimen 1\_espera 4. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

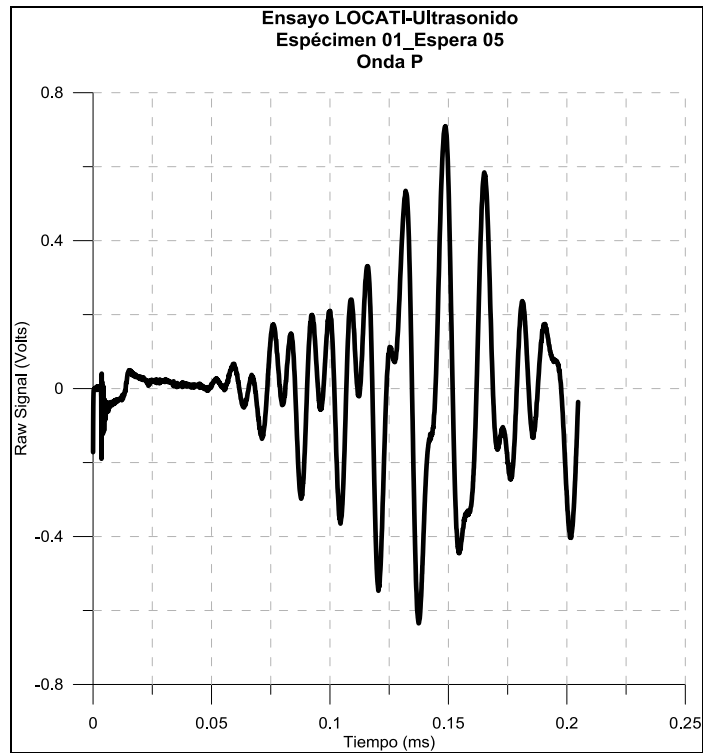


Figura 170 Onda P, espécimen 1\_espera 5. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

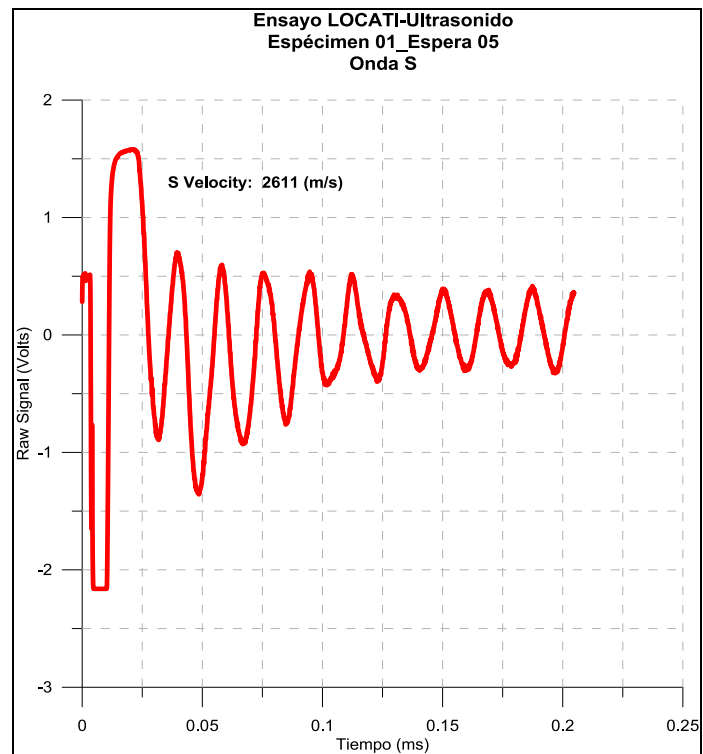


Figura 171 Onda S, espécimen 1\_espera 5. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

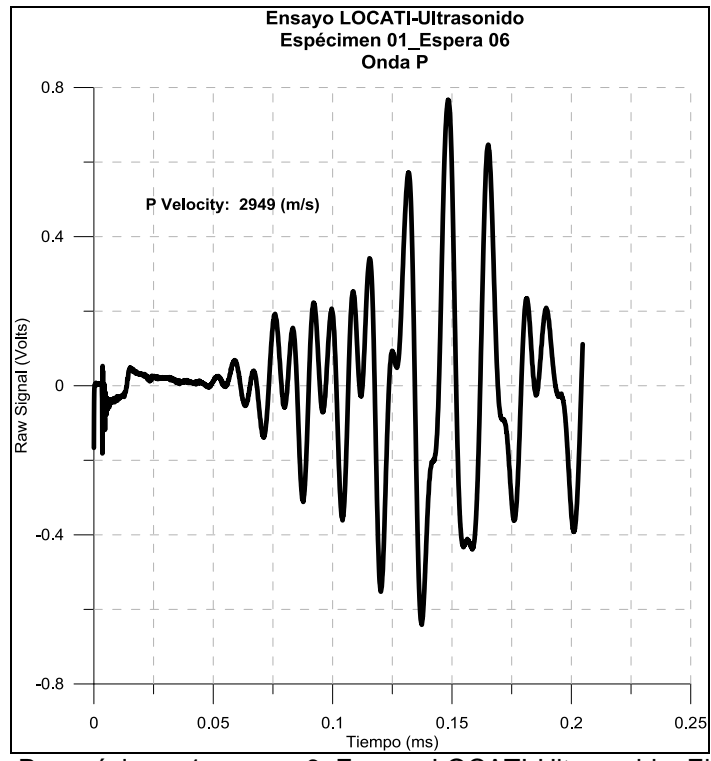


Figura 172 Onda P, espécimen 1\_espera 6. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

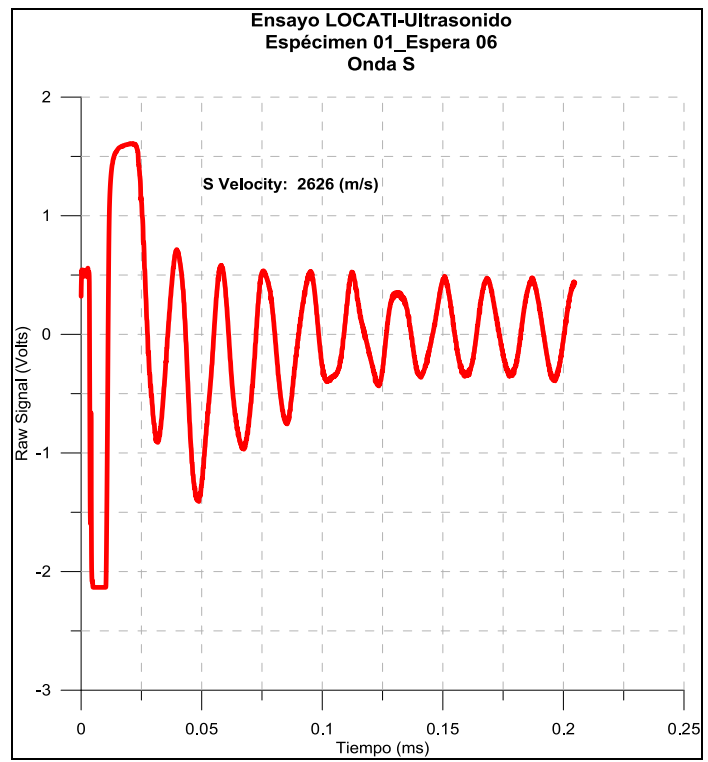


Figura 173 Onda S, espécimen 1\_espera 6. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia.

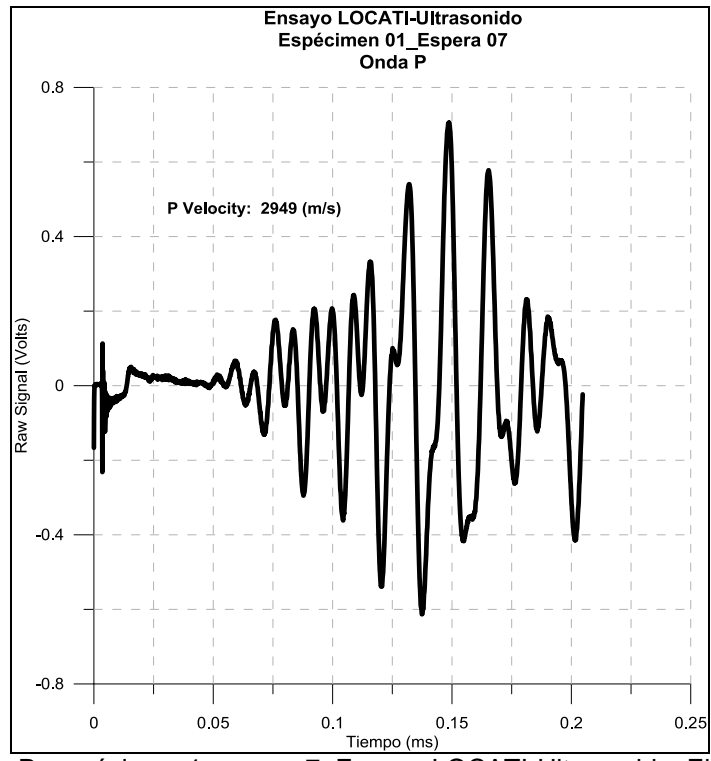


Figura 174 Onda P, espécimen 1\_espera 7. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

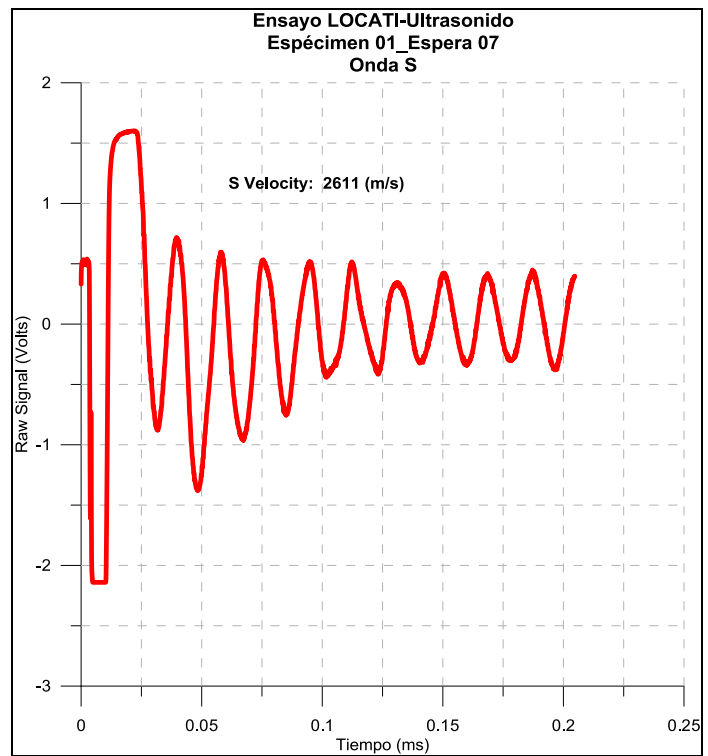


Figura 175 Onda S, espécimen 1\_espera 7. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

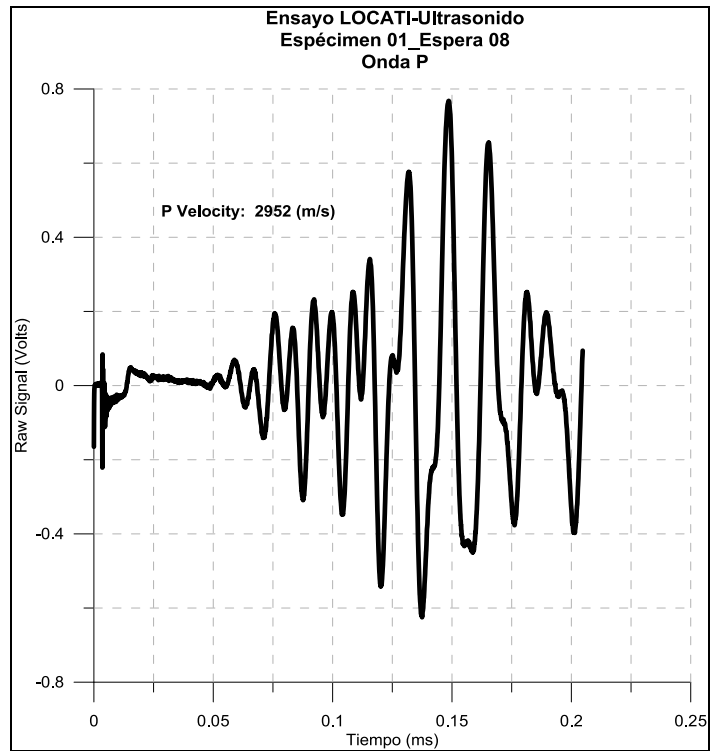


Figura 176 Onda P, espécimen 1\_espera 8. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

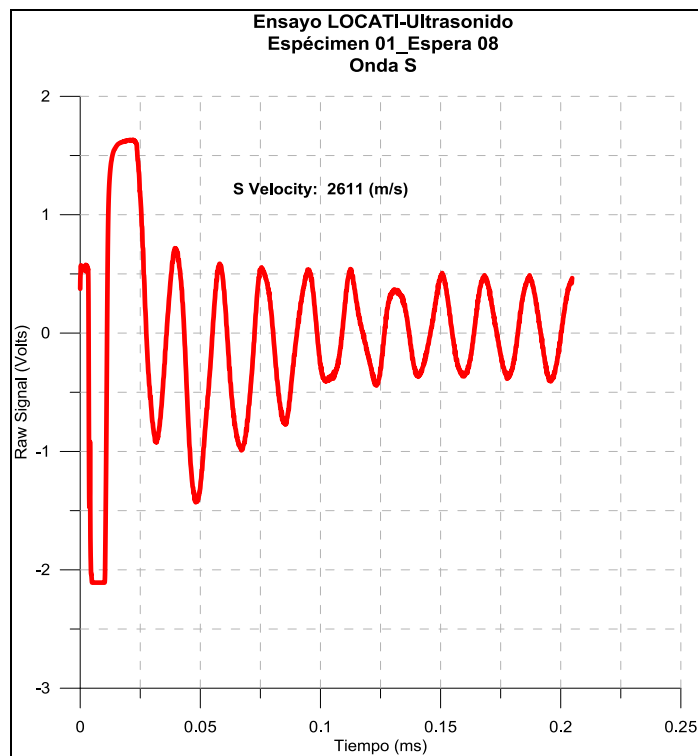


Figura 177 Onda S, espécimen 1\_espera 8. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia



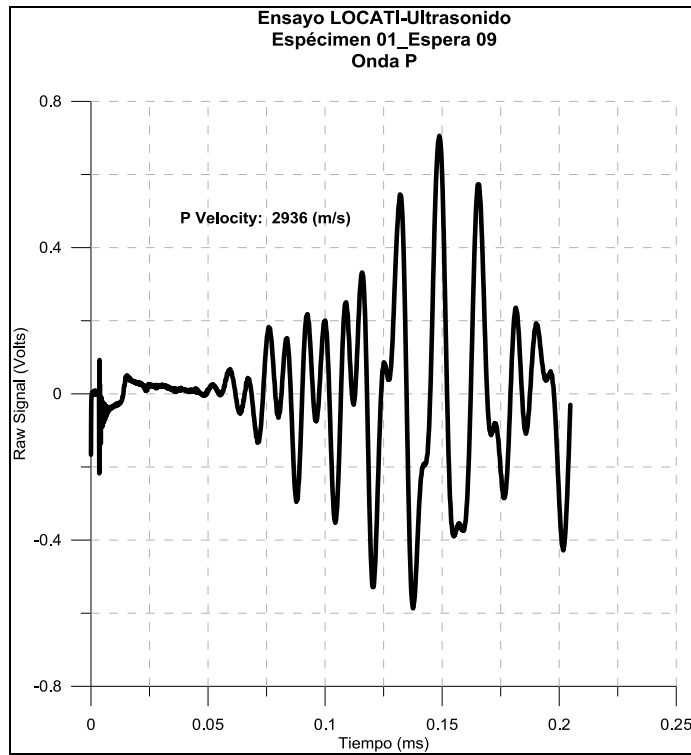


Figura 178 Onda P, espécimen 1\_espera 9. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

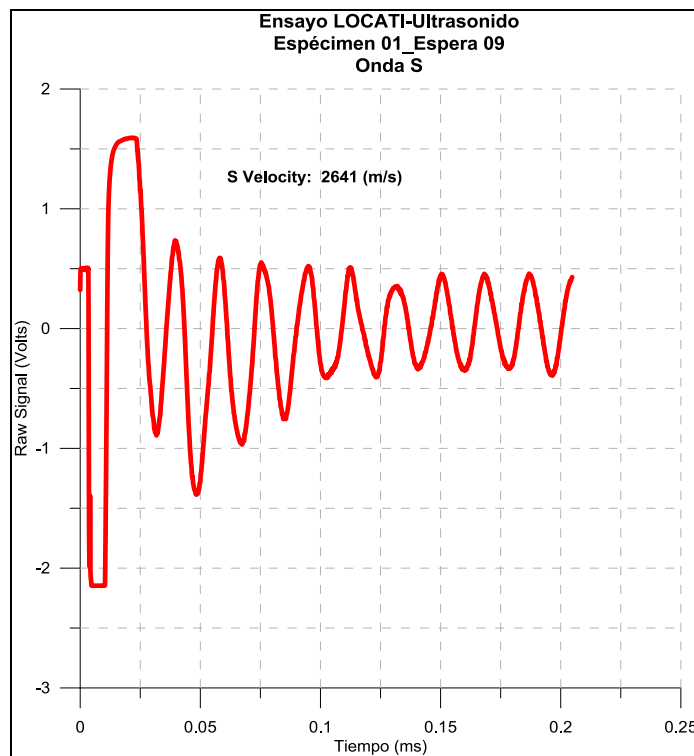


Figura 179 Onda S, espécimen 1\_espera 9. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

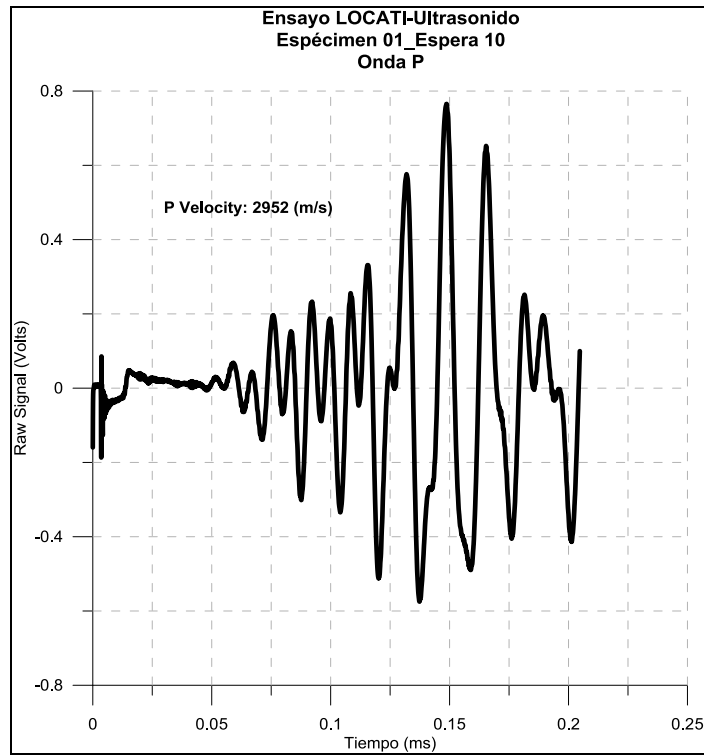


Figura 180 Onda P, espécimen 1\_espera 10. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

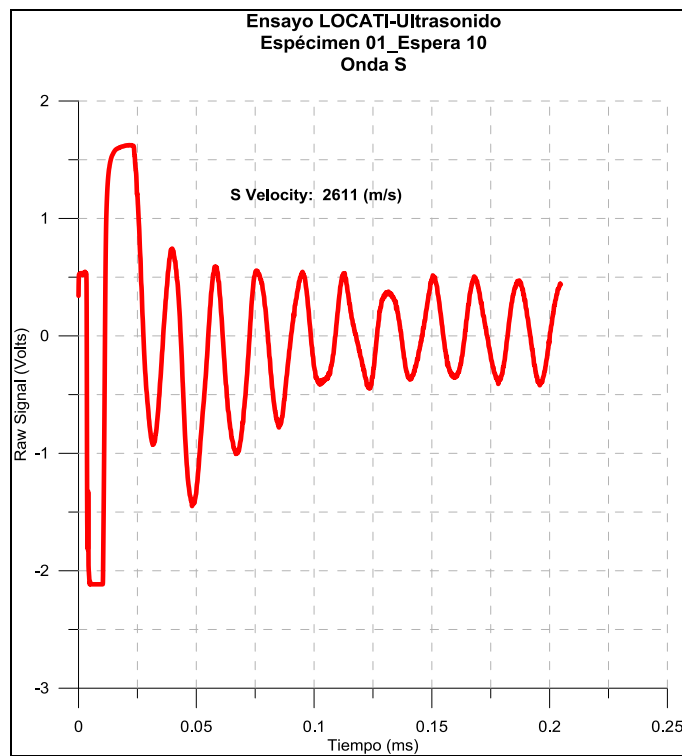


Figura 181 Onda S, espécimen 1\_espera 10. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

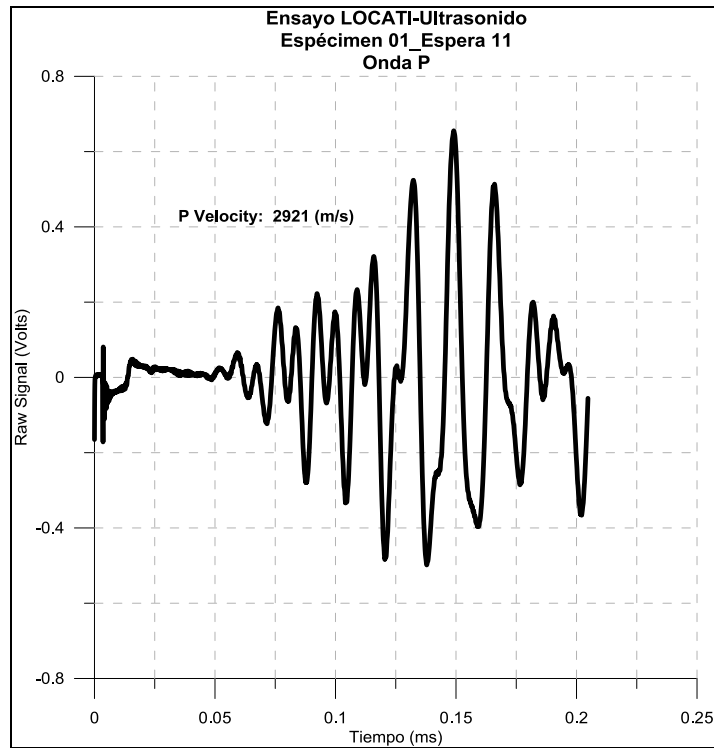


Figura 182 Onda P, espécimen 1\_espera 11. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

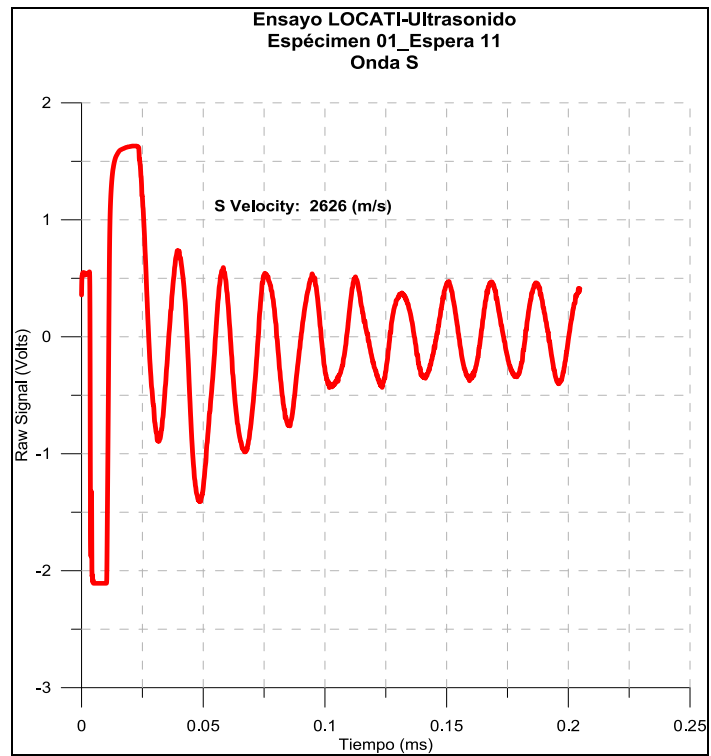


Figura 183 Onda S, espécimen 1\_espera 11. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

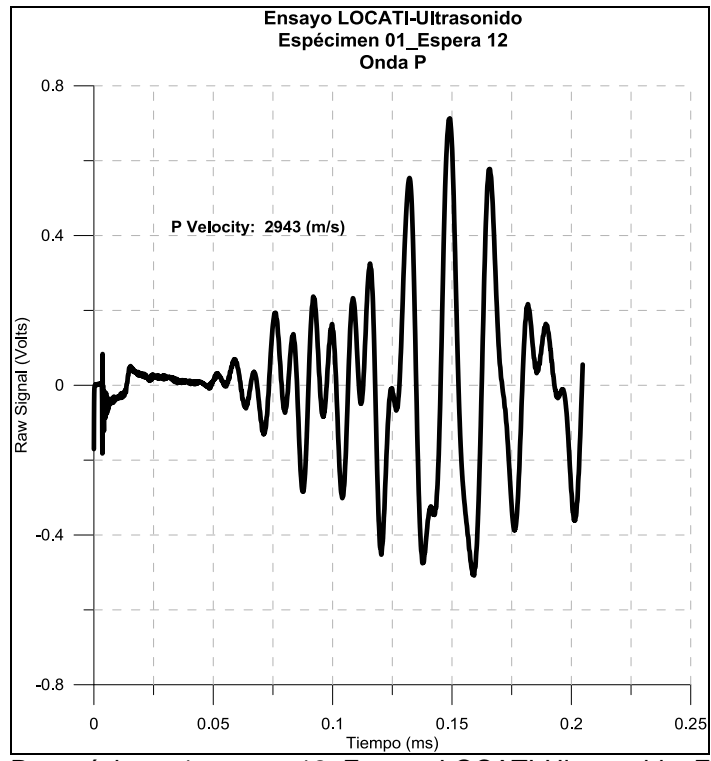


Figura 184 Onda P, espécimen 1\_espera 12. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

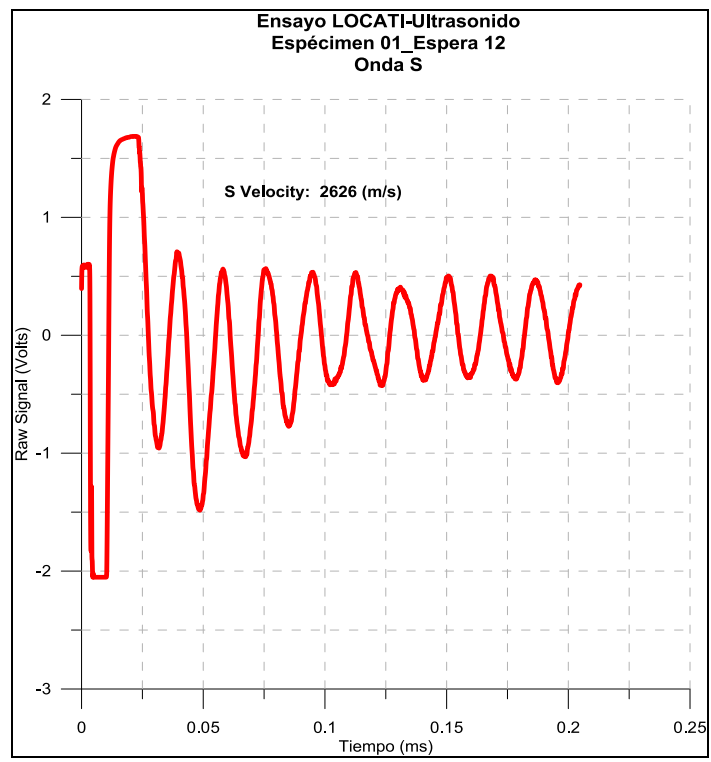


Figura 185 Onda S, espécimen 1\_espera 12. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

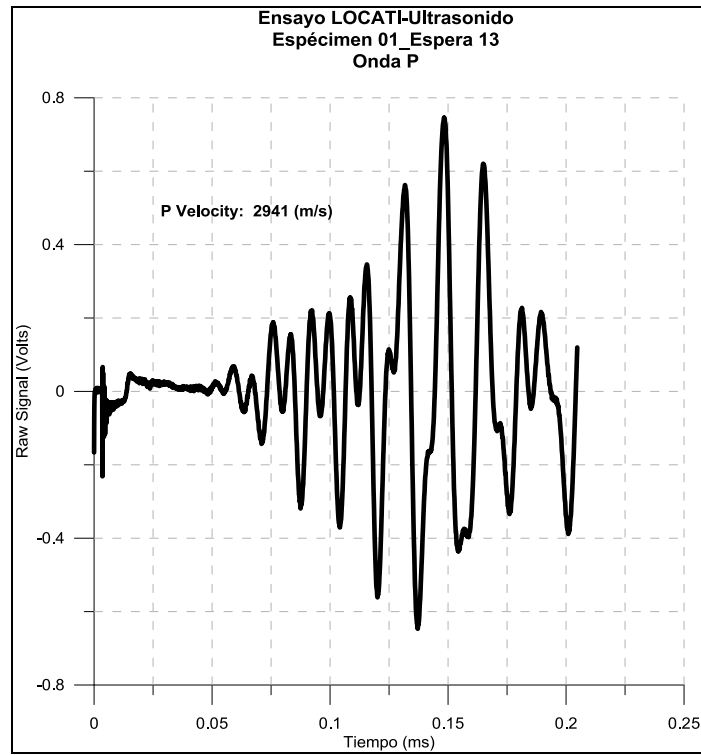


Figura 186 Onda P, espécimen 1\_espera 13. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

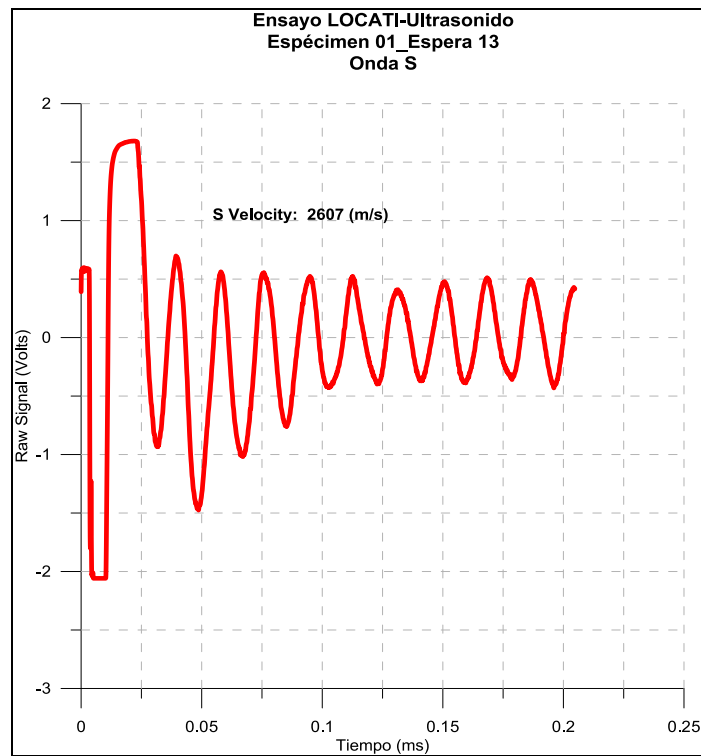


Figura 187 Onda S, espécimen 1\_espera 13. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

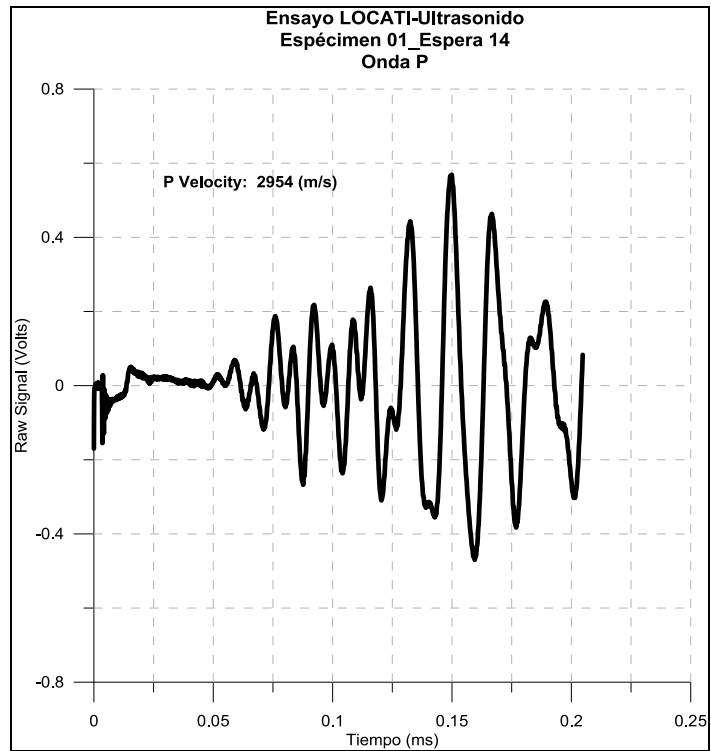


Figura 188 Onda P, espécimen 1\_espera 14. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

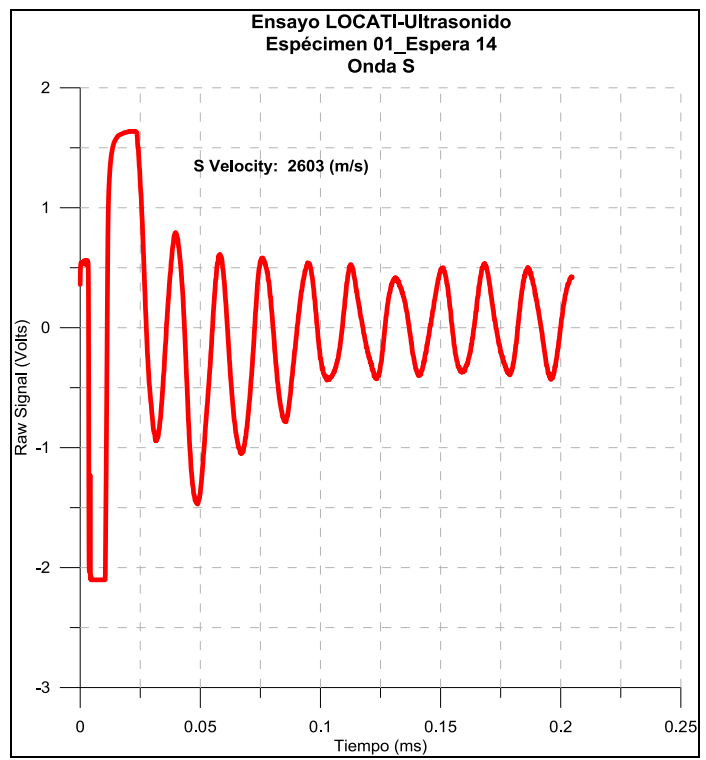


Figura 189 Onda S, espécimen 1\_espera 14. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

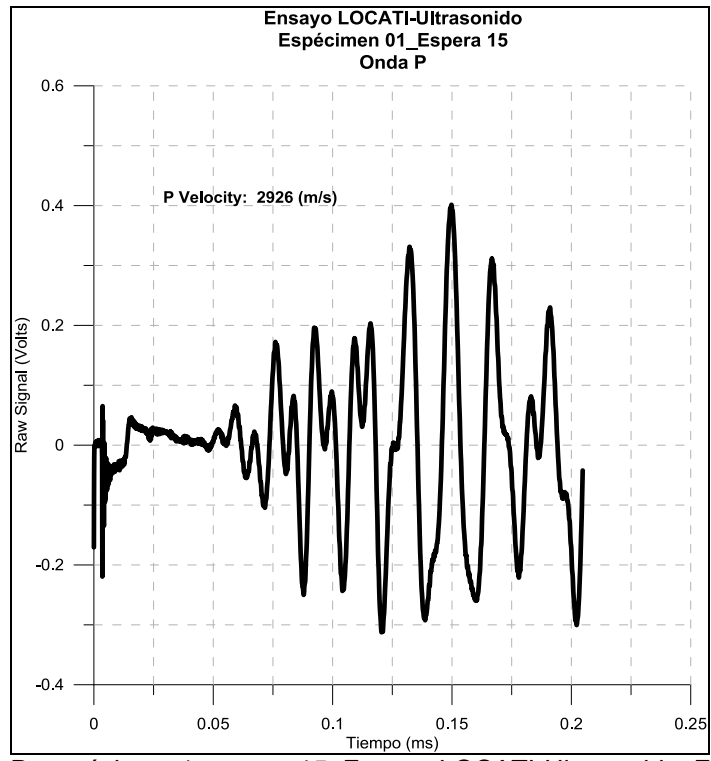


Figura 190 Onda P, espécimen 1\_espera 15. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

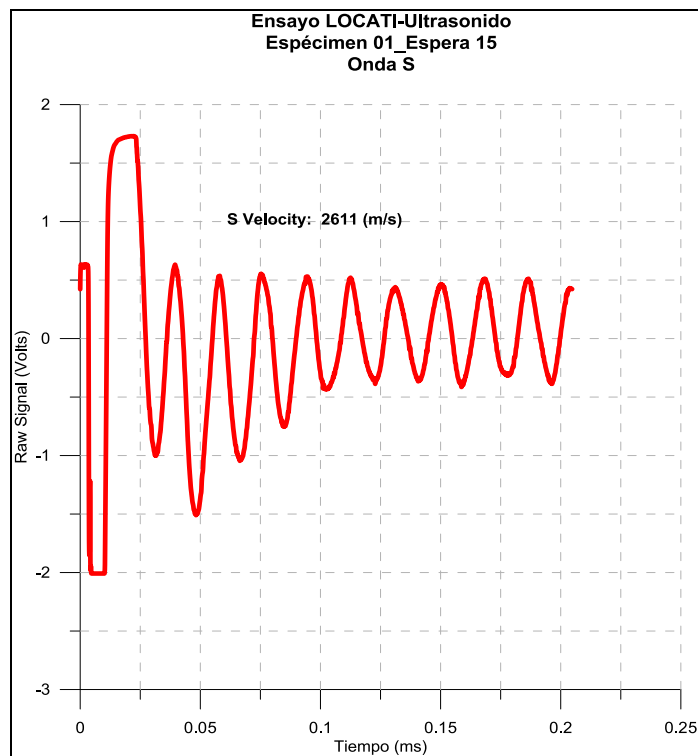


Figura 191 Onda S, espécimen 1\_espera 15. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

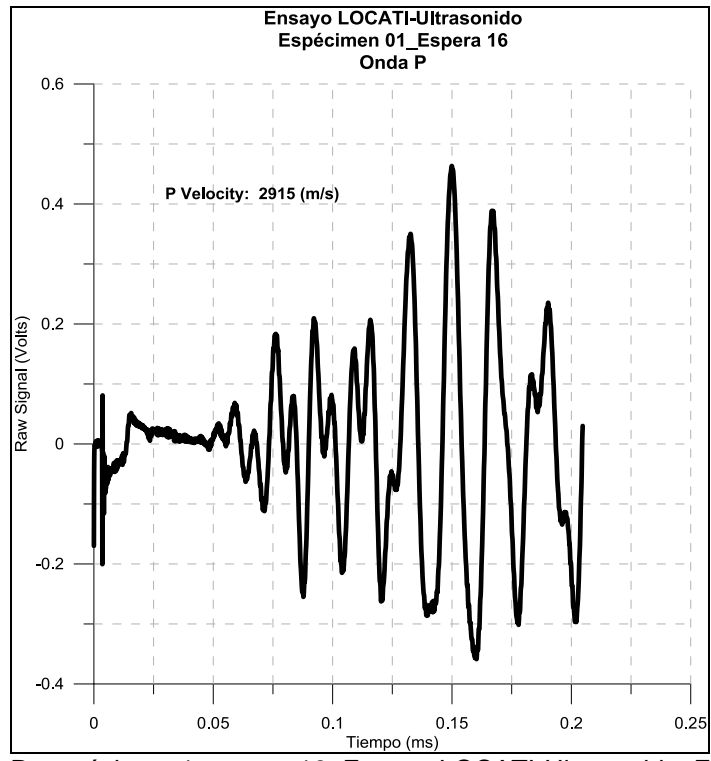


Figura 192 Onda P, espécimen 1\_espera 16. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

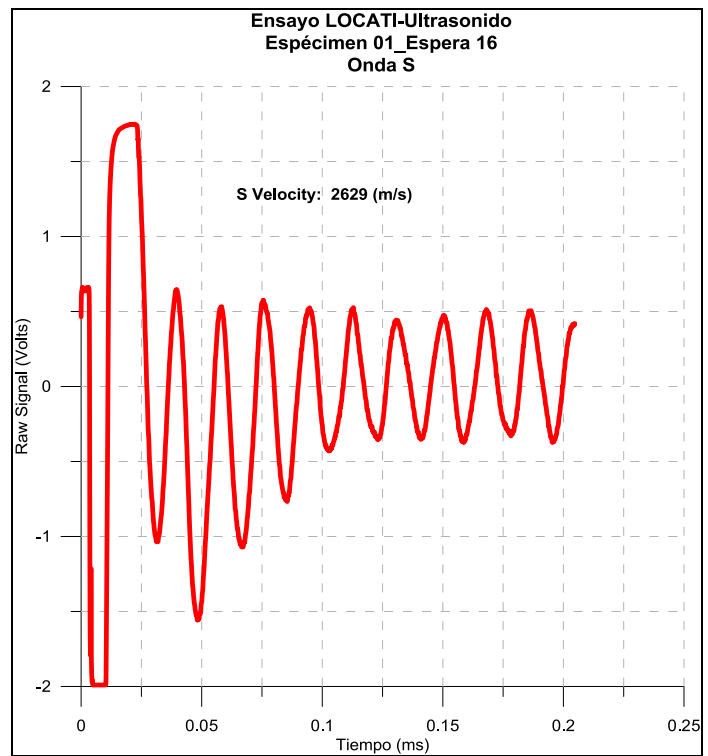


Figura 193 Onda S, espécimen 1\_espera 16. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia



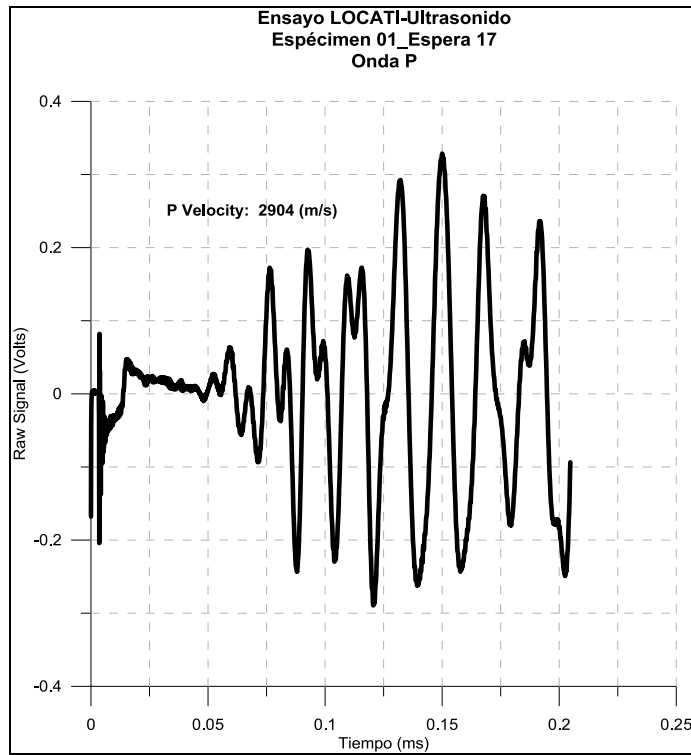


Figura 194 Onda P, espécimen 1\_espera 17. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

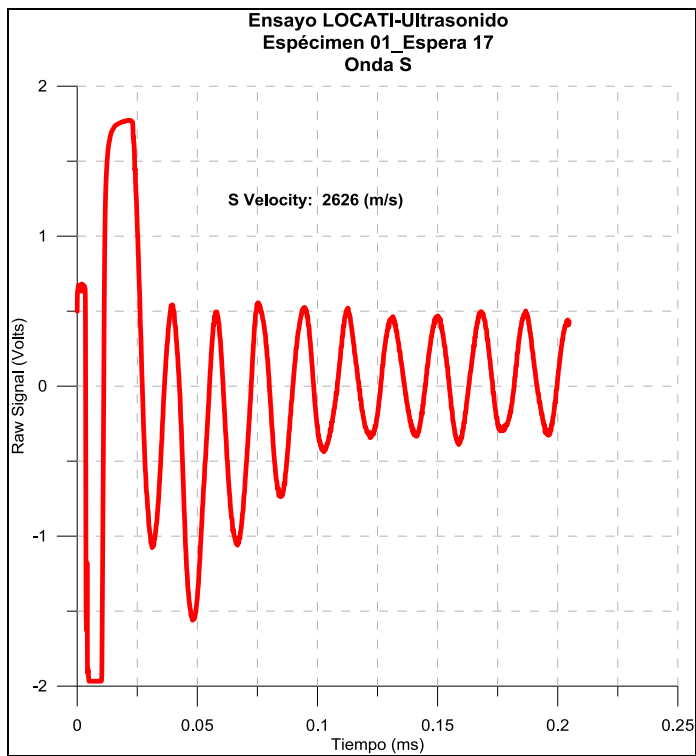


Figura 195 Onda S, espécimen 1\_espera 17. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

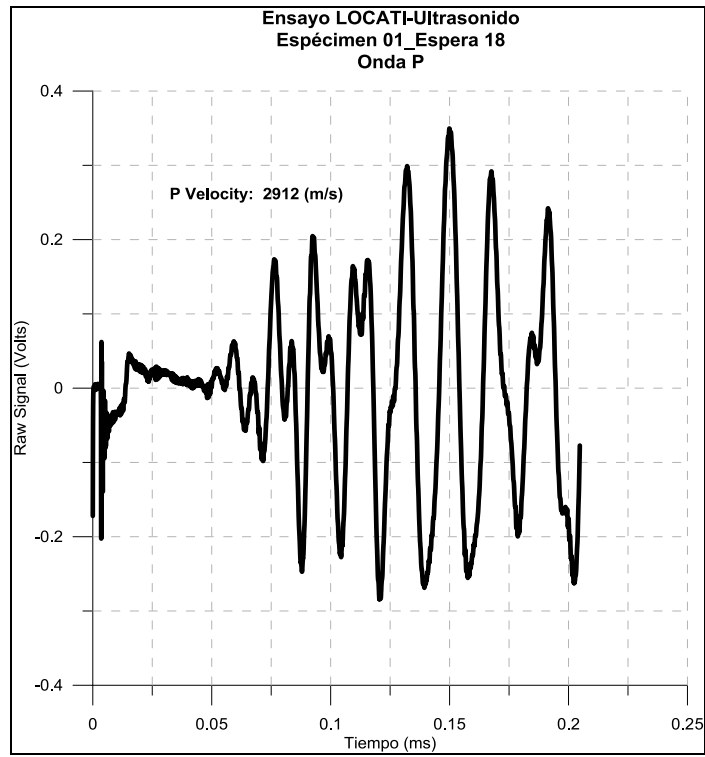


Figura 196 Onda P, espécimen 1\_espera 18. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

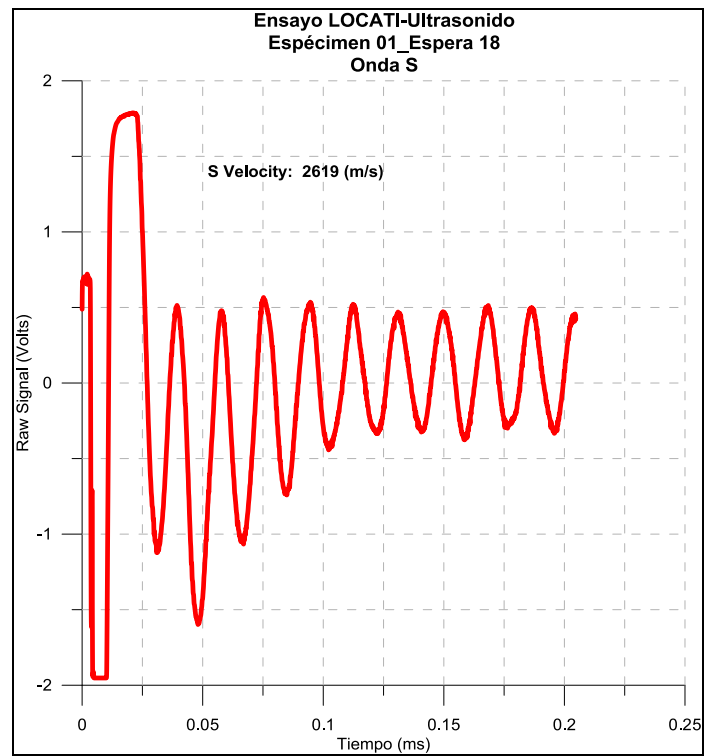


Figura 197 Onda S, espécimen 1\_espera 18. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

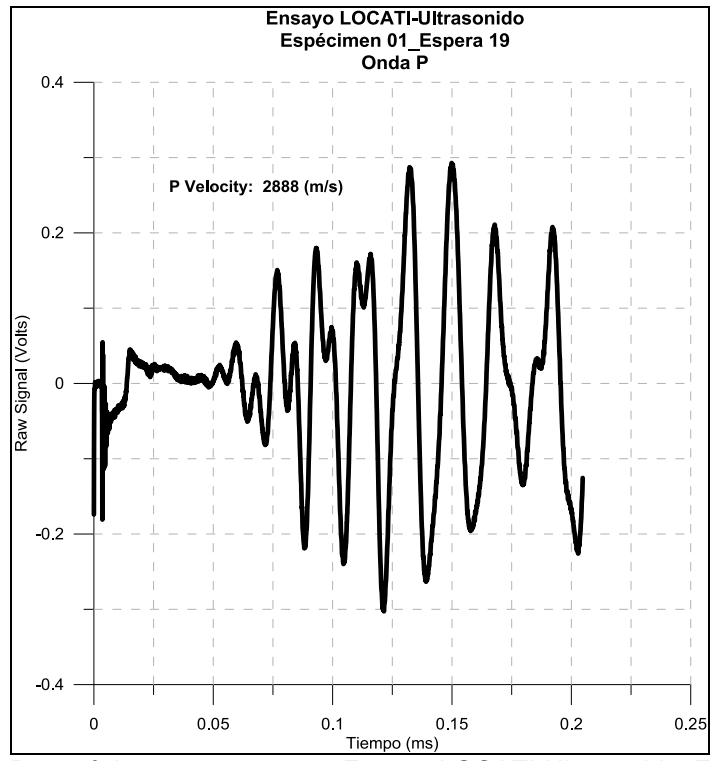


Figura 198 Onda P, espécimen 1\_espera 19. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

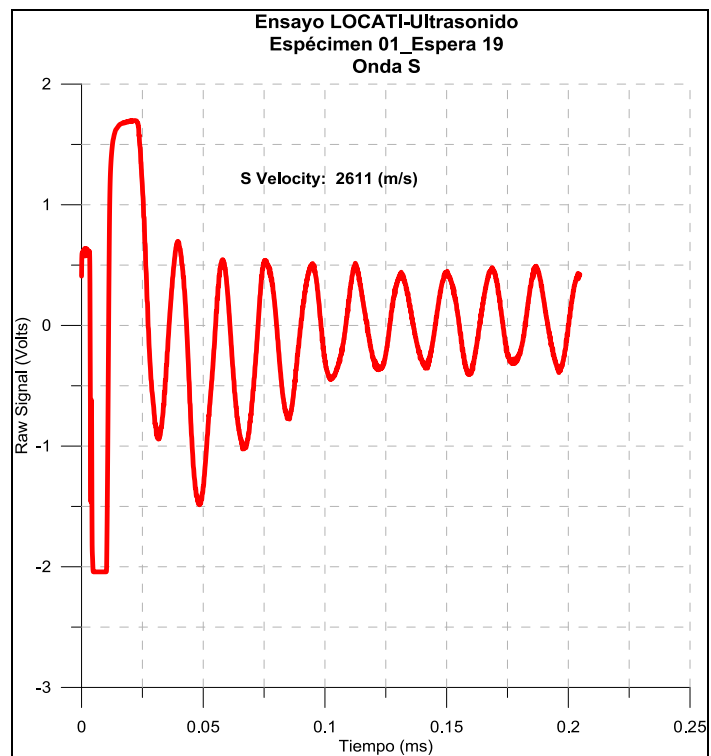


Figura 199 Onda S, espécimen 1\_espera 19. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

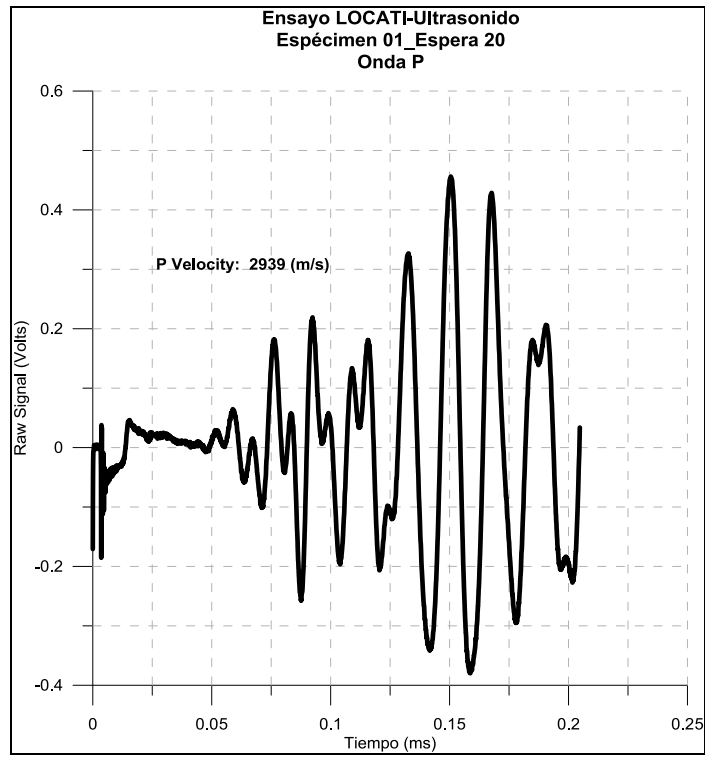


Figura 200 Onda P, espécimen 1\_espera 20. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

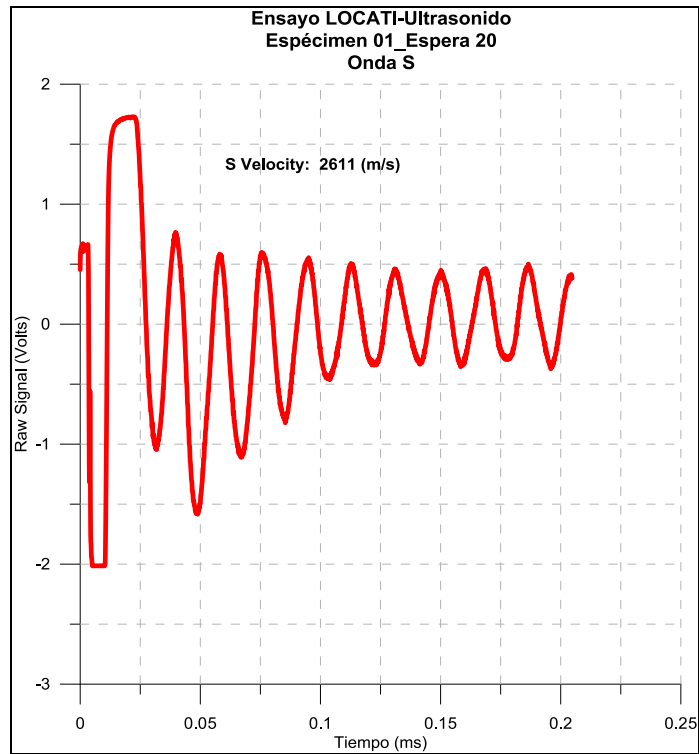


Figura 201 Onda S, espécimen 1\_espera 20. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

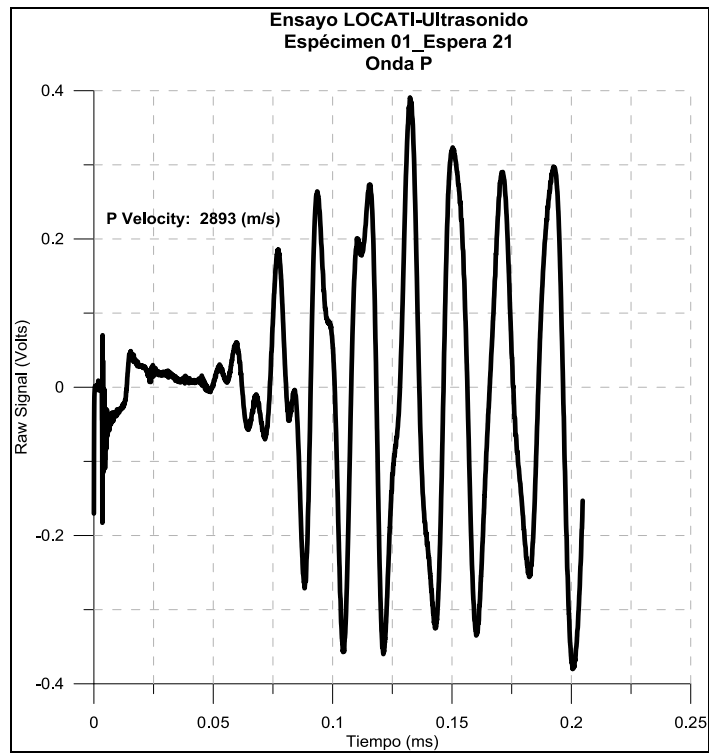


Figura 202 Onda P, espécimen 1\_espera 21. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

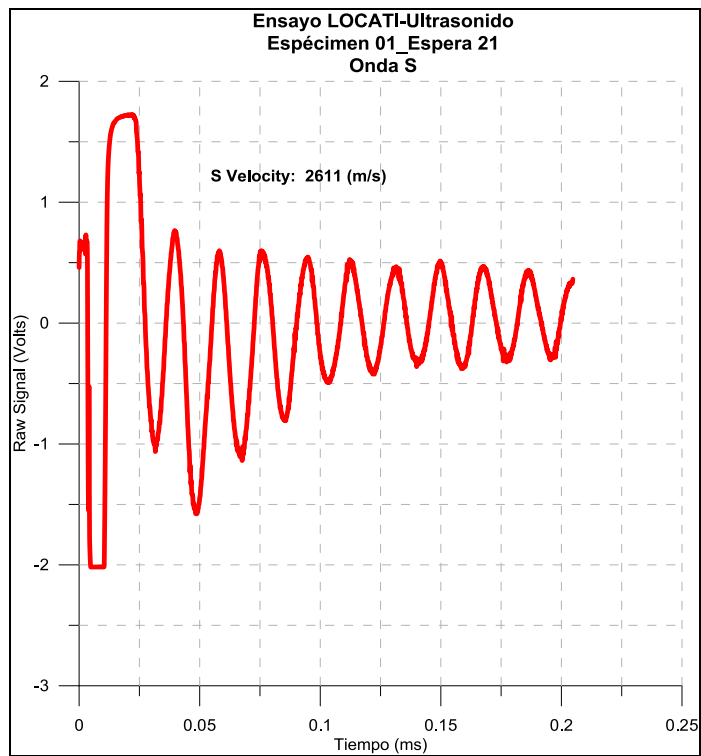


Figura 203 Onda S, espécimen 1\_espera 21. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

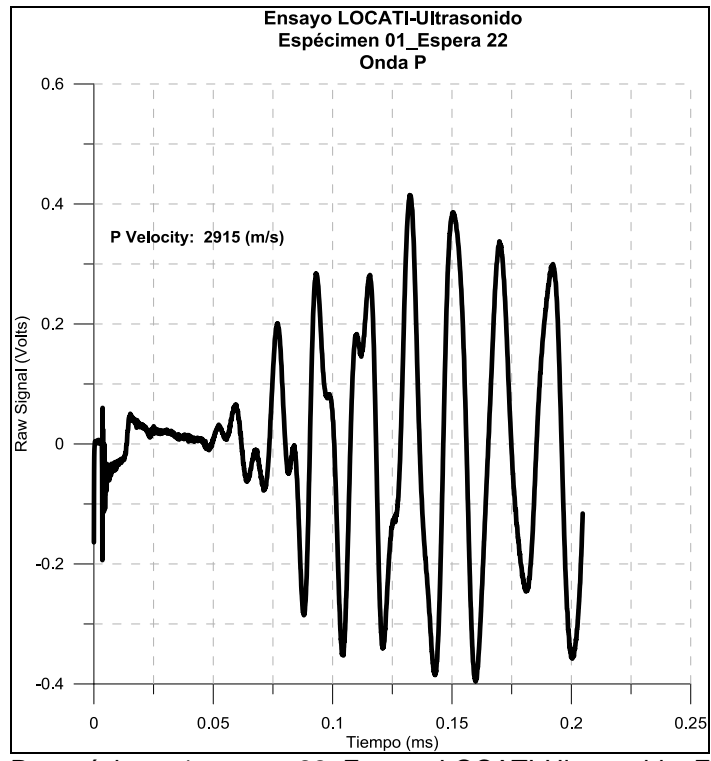


Figura 204 Onda P, espécimen 1\_espera 22. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

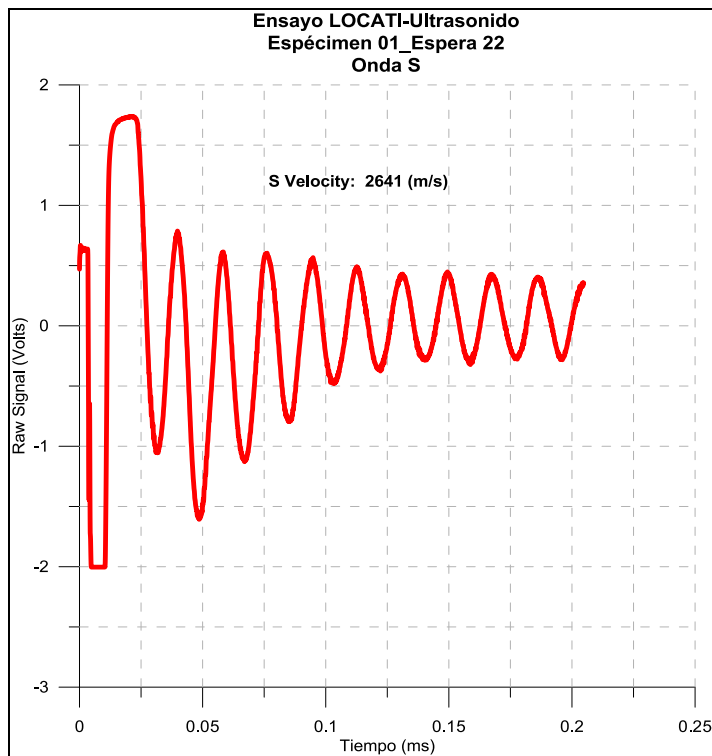


Figura 205 Onda S, espécimen 1\_espera 22. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

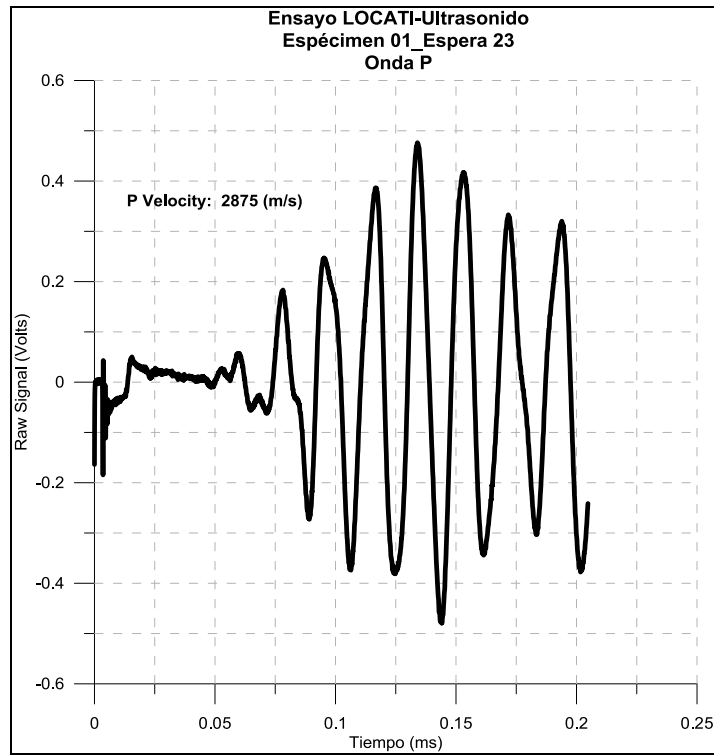


Figura 206 Onda P, espécimen 1\_espera 23. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

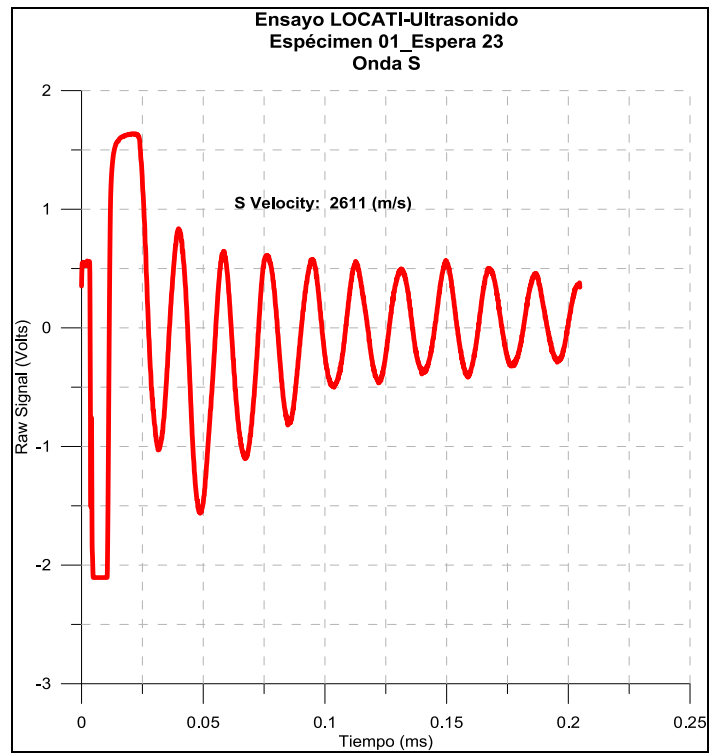


Figura 207 Onda S, espécimen 1\_espera 23. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

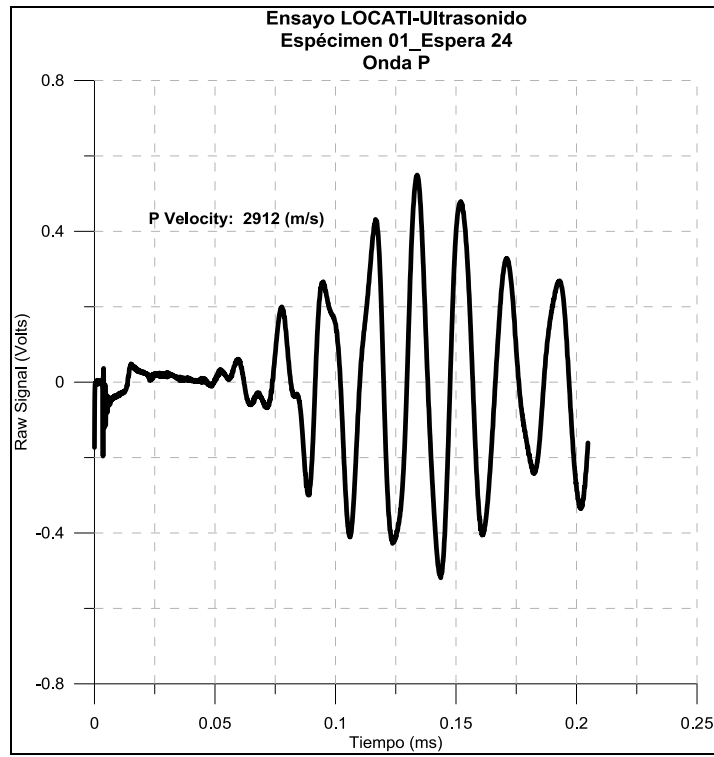


Figura 208 Onda P, espécimen 1\_espera 24. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

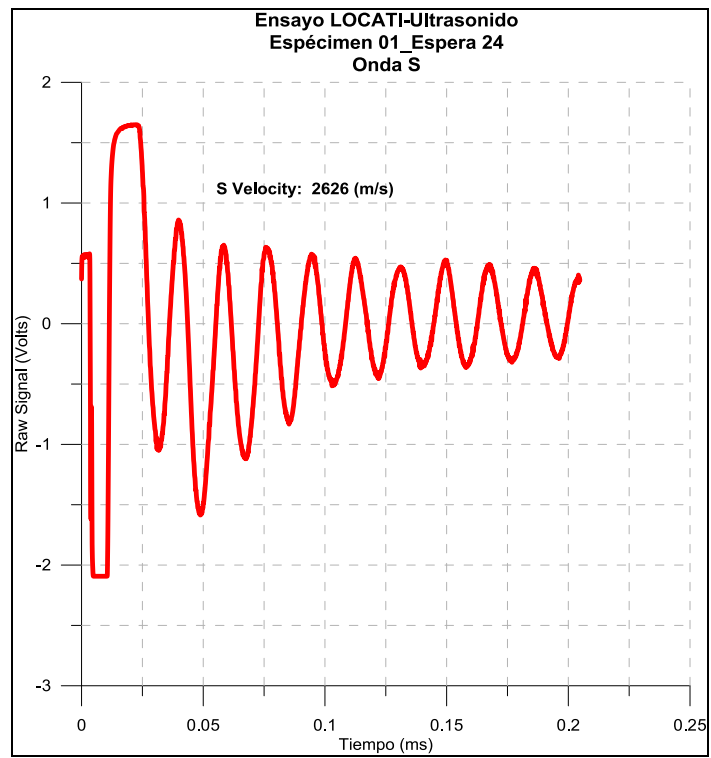


Figura 209 Onda S, espécimen 1\_espera 24. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia



## I.2 Ondas de ultrasonido para el espécimen 2

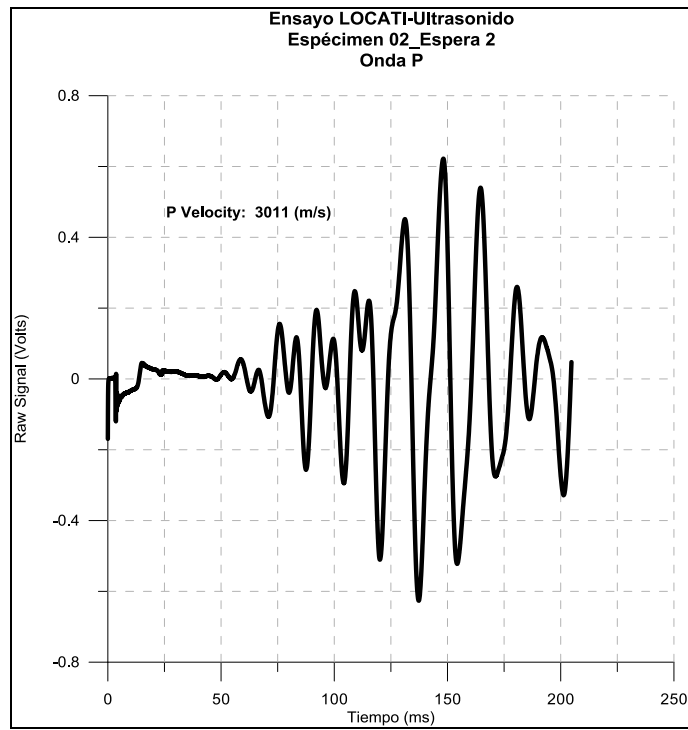


Figura 210 Onda P, espécimen 2\_espera 2. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

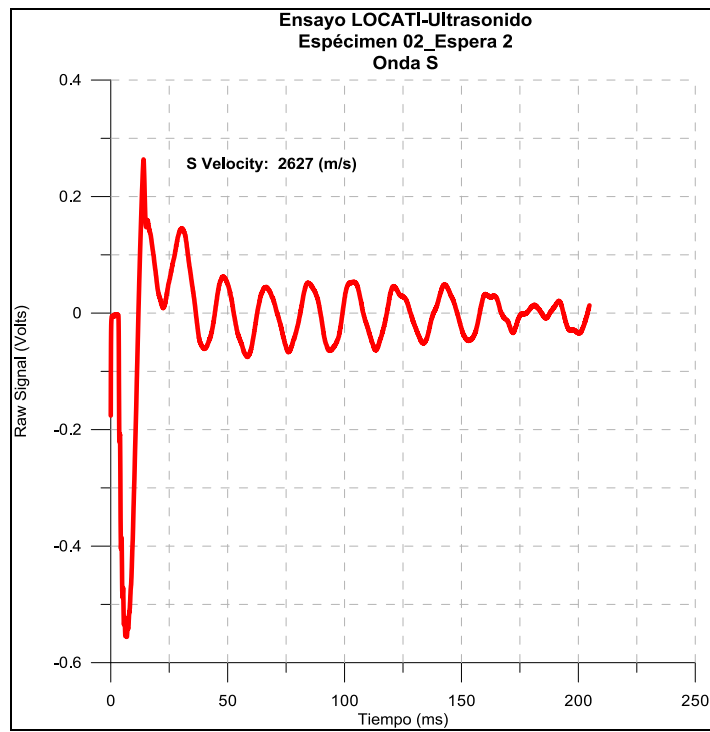


Figura 211 Onda S, espécimen 2\_espera 2. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

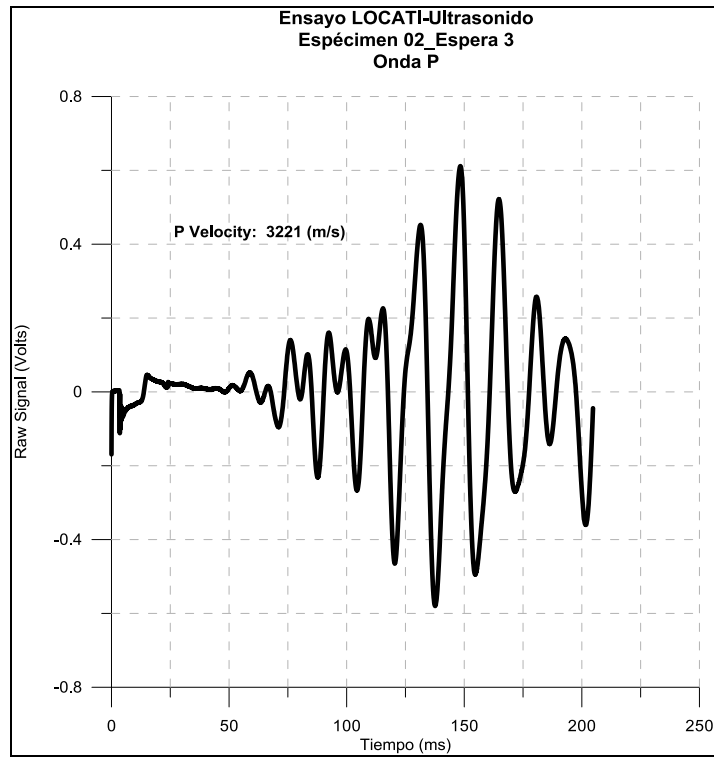


Figura 212 Onda P, espécimen 2\_espera 3. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

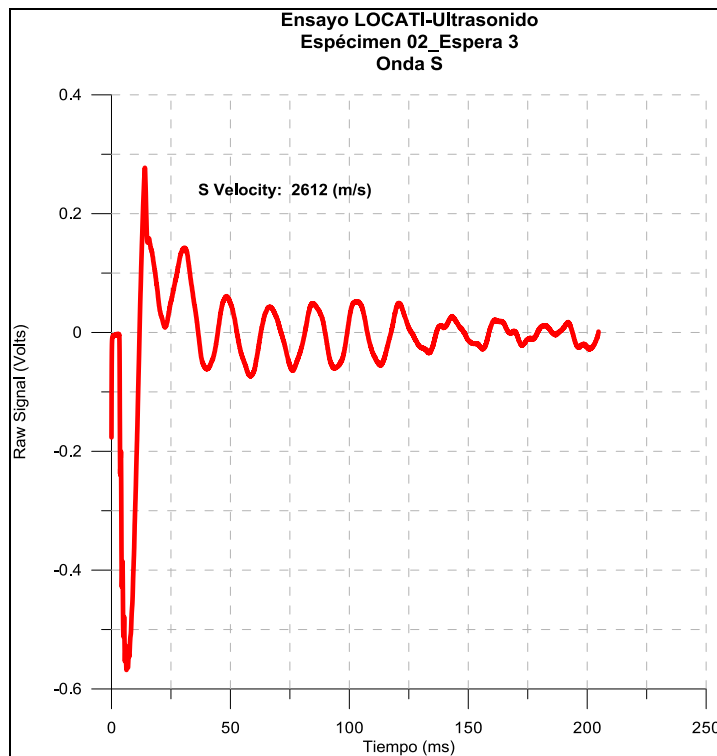


Figura 213 Onda S, espécimen 2\_espera 3. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

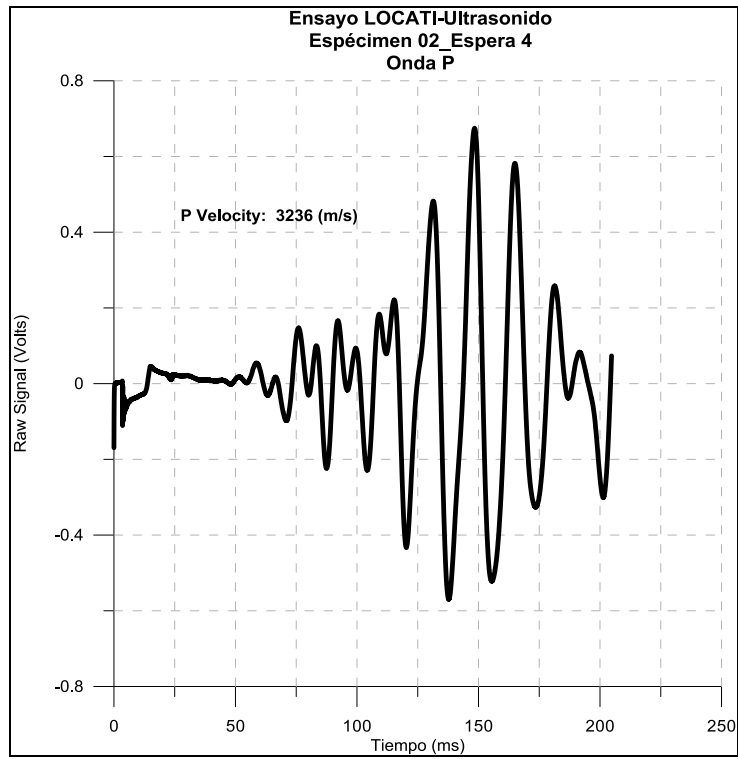


Figura 214 Onda P, espécimen 2\_espera 4. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

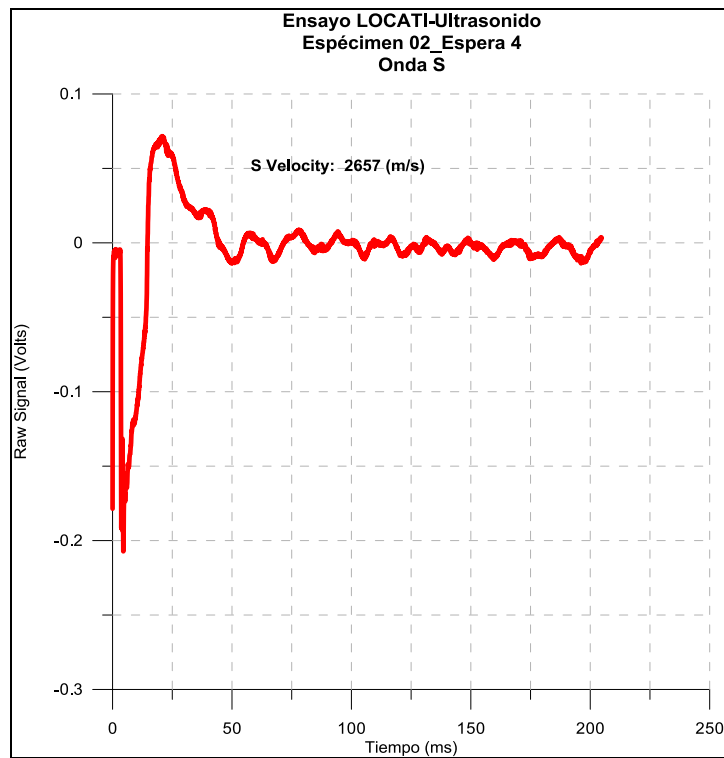


Figura 215 Onda S, espécimen 2\_espera 4. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

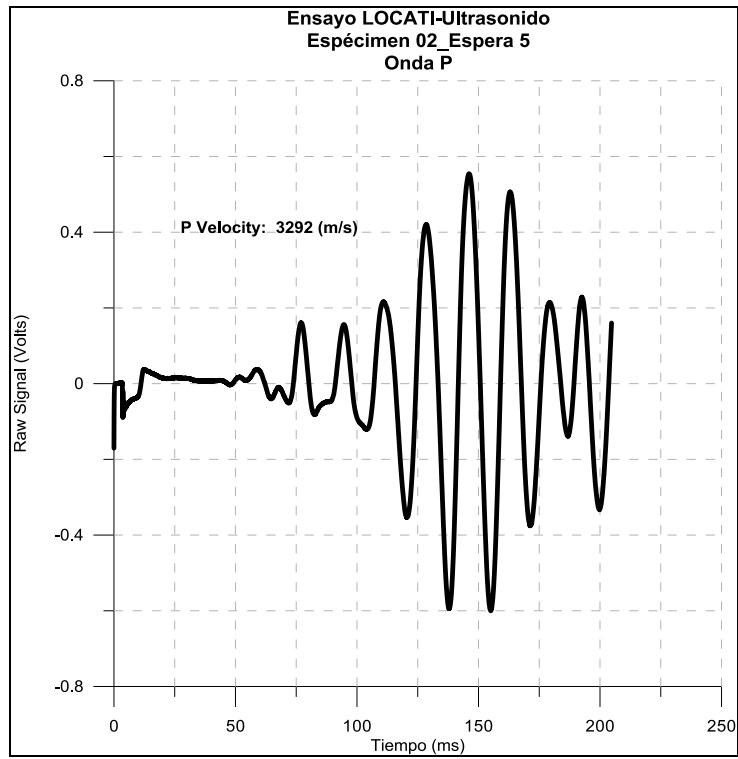


Figura 216 Onda P, espécimen 2\_espera 5. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

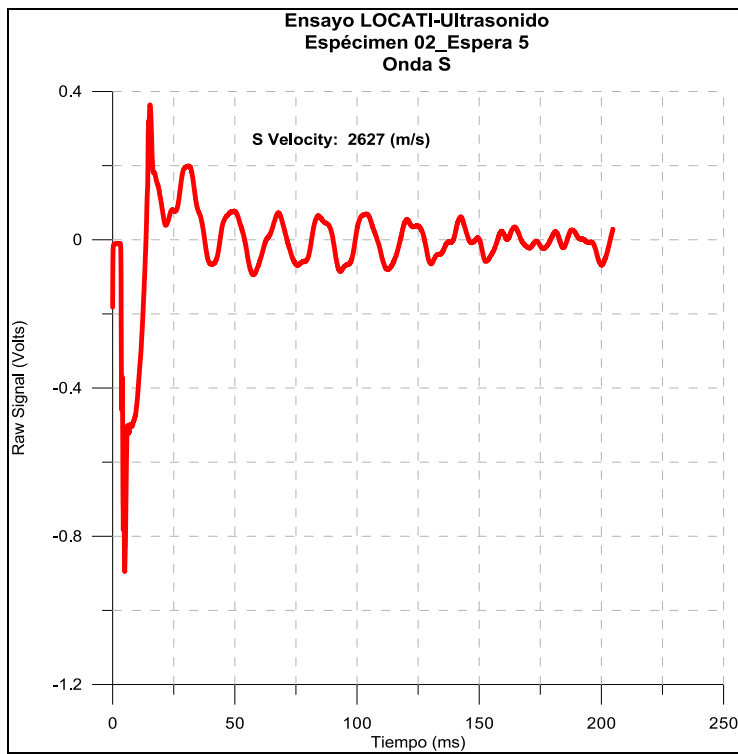


Figura 217 Onda S, espécimen 2\_espera 5. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

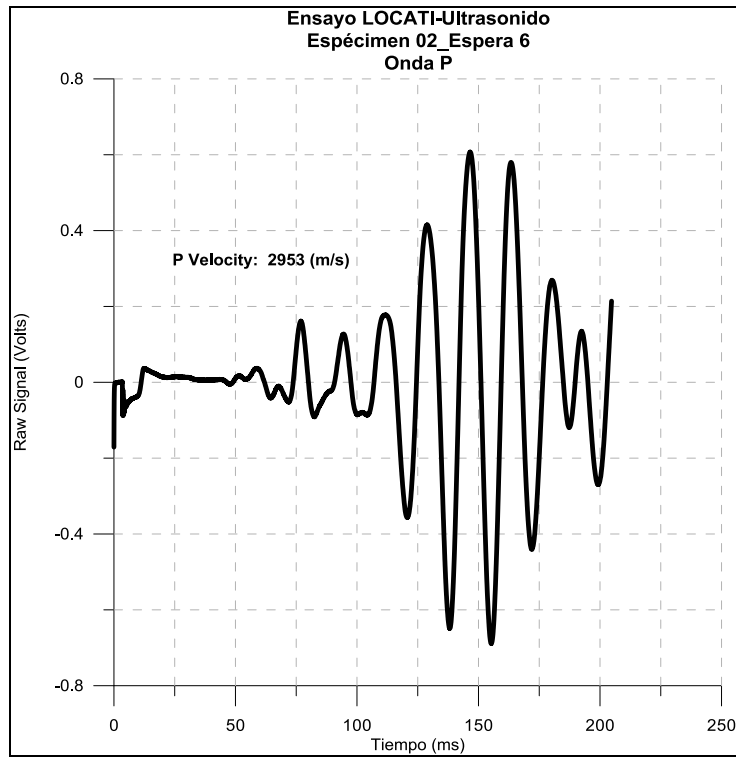


Figura 218 Onda P, espécimen 2\_espera 6. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

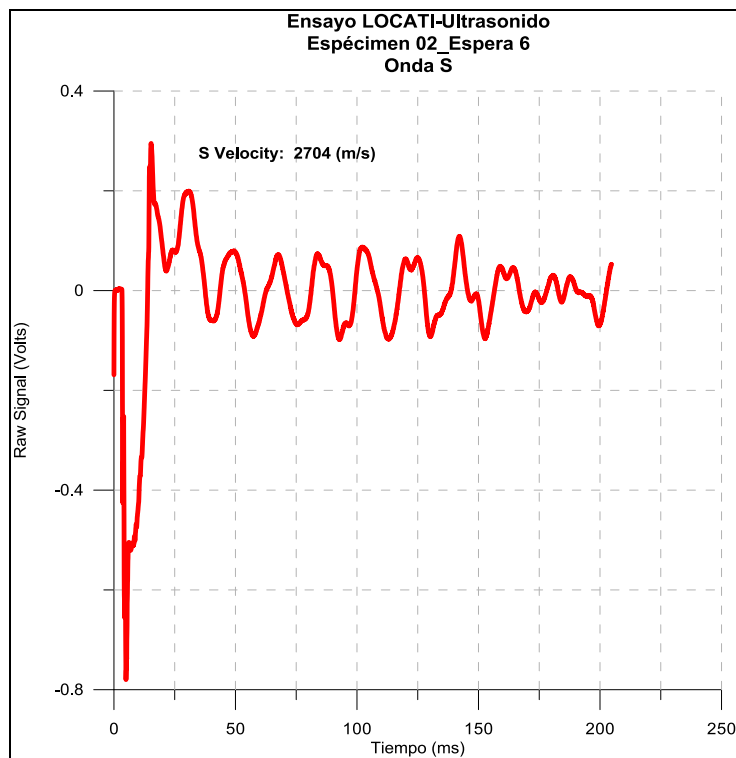


Figura 219 Onda S, espécimen 2\_espera 6. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

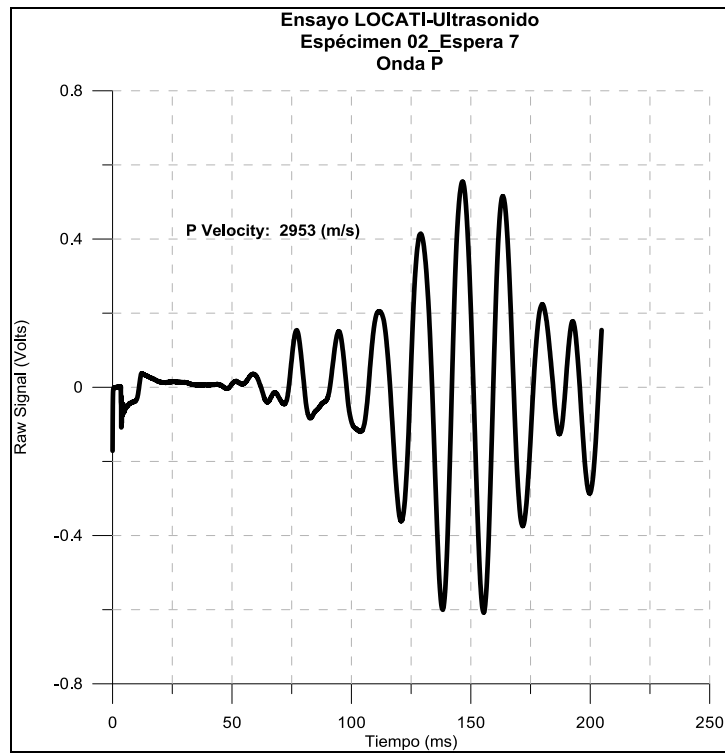


Figura 220 Onda P, espécimen 2\_espera 7. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

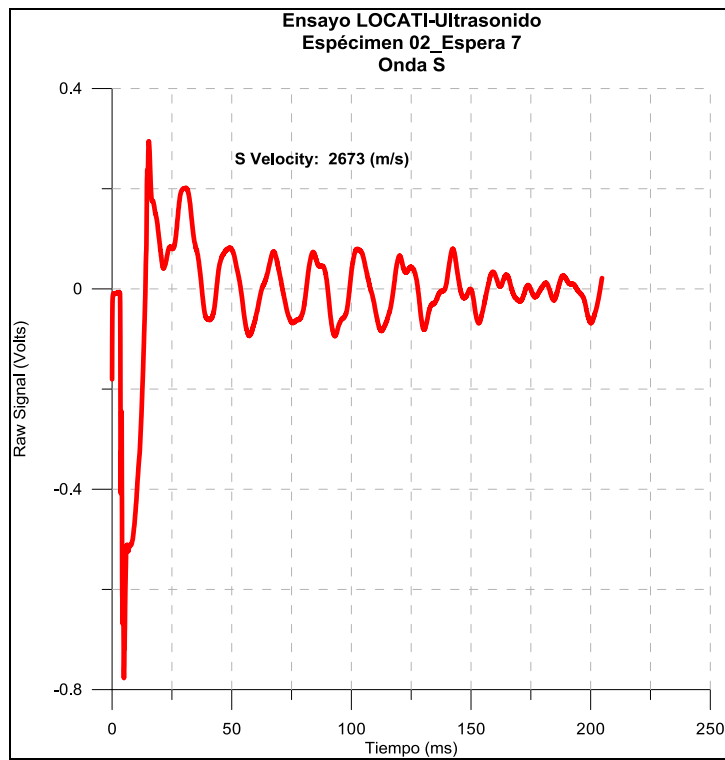


Figura 221 Onda S, espécimen 2\_espera 72. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

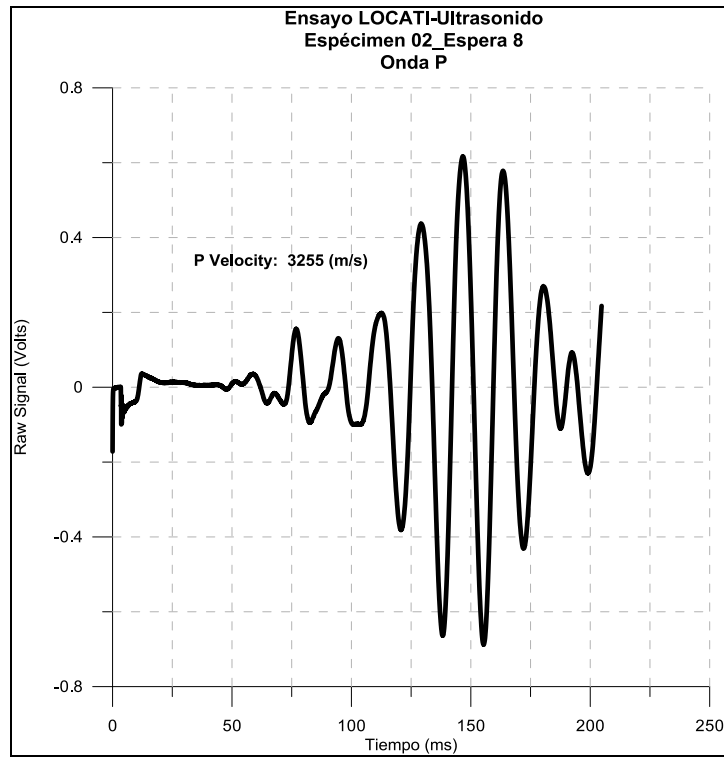


Figura 222 Onda P, espécimen 2\_espera 8. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

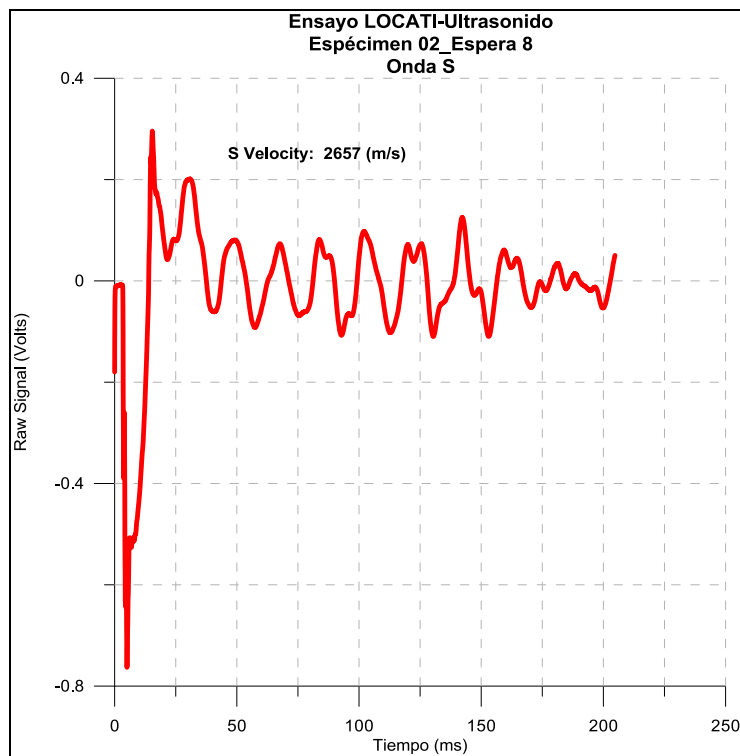


Figura 223 Onda S, espécimen 2\_espera 8. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

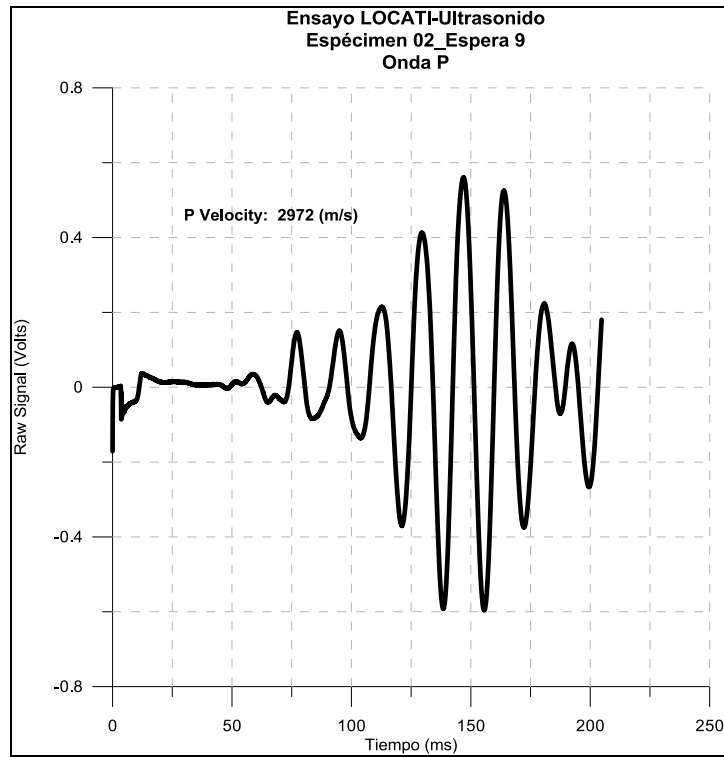


Figura 224 Onda P, espécimen 2\_espera 9. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

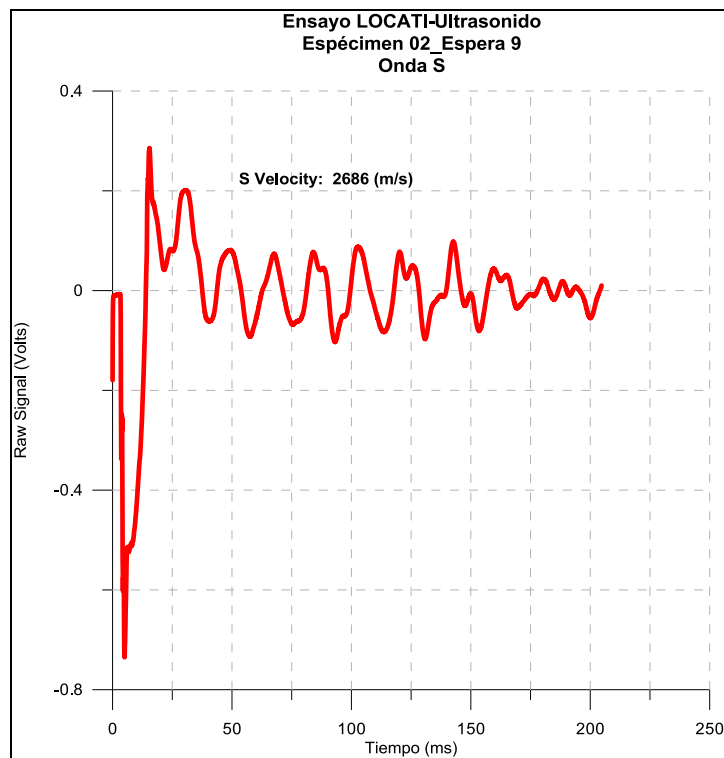


Figura 225 Onda S, espécimen 2\_espera 9. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia



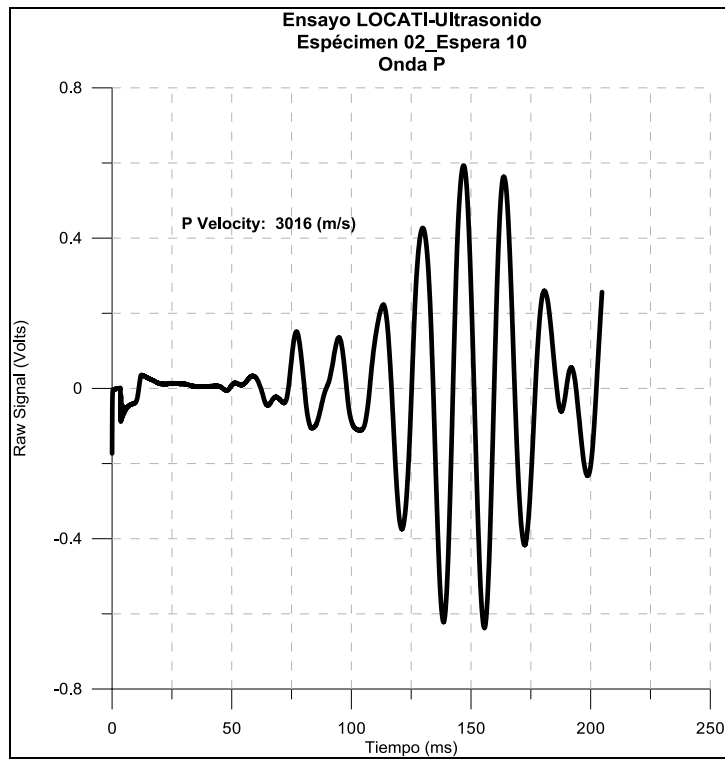


Figura 226 Onda P, espécimen 2\_espera 10. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

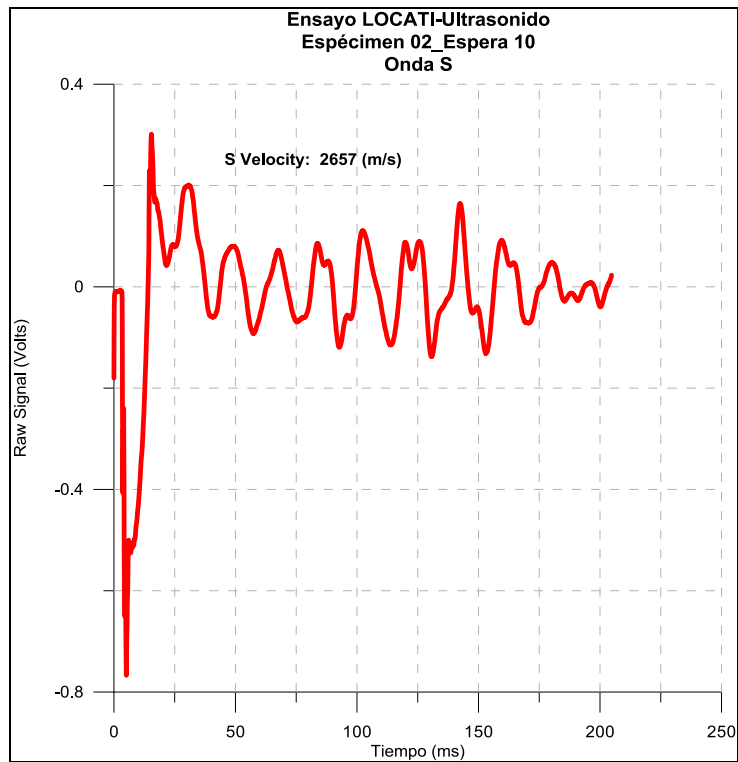


Figura 227 Onda S, espécimen 2\_espera 10. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

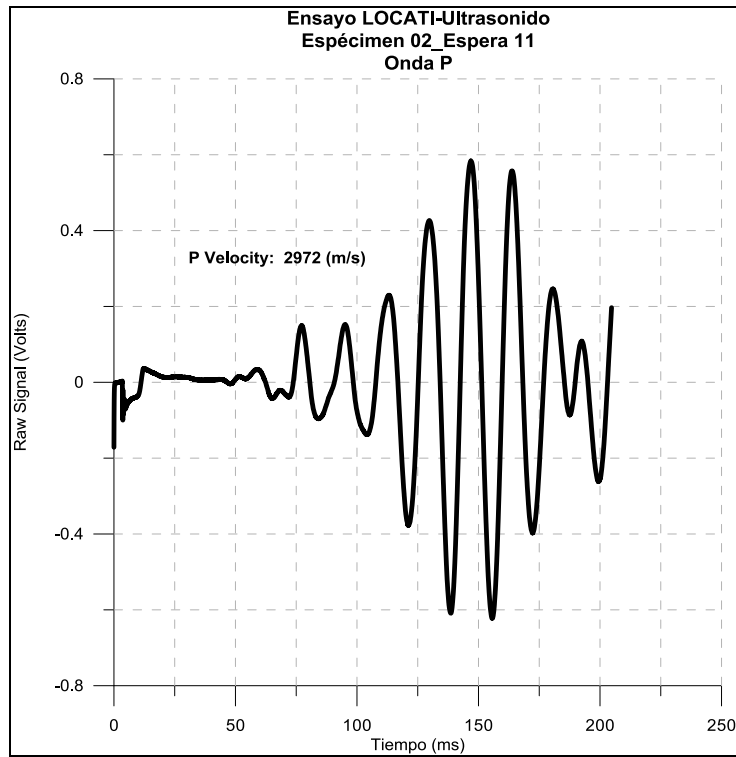


Figura 228 Onda P, espécimen 2\_espera 11. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

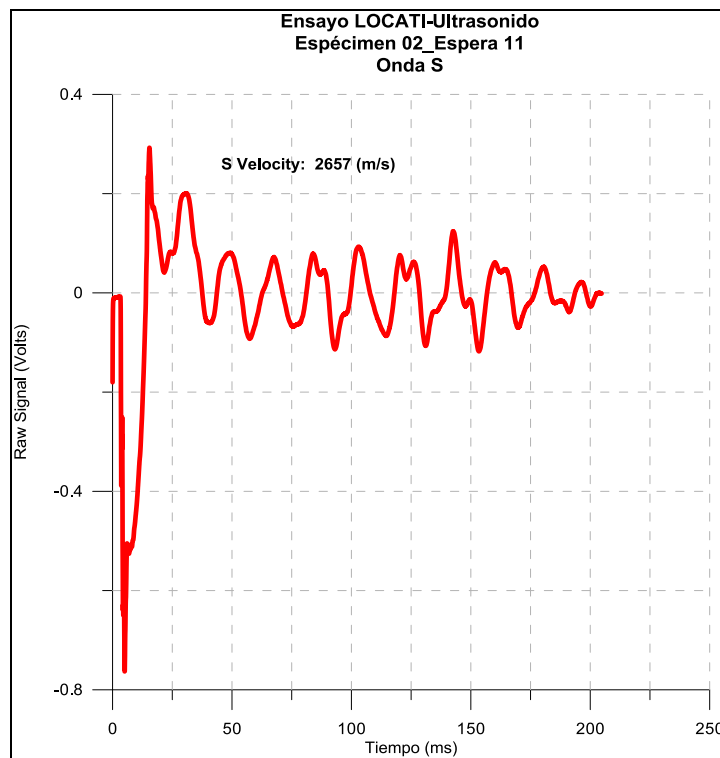


Figura 229 Onda S, espécimen 2\_espera 11. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

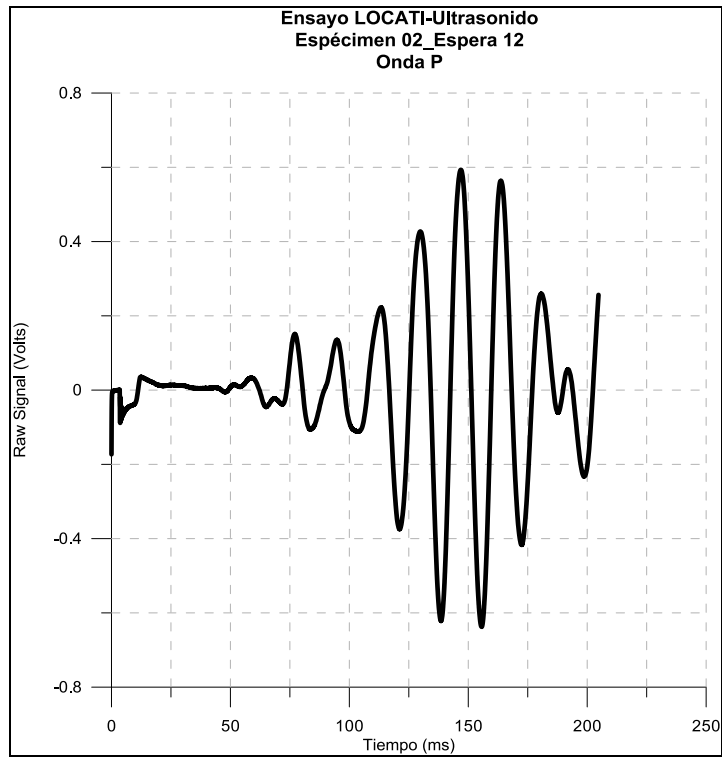


Figura 230 Onda P, espécimen 2\_espera 12. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

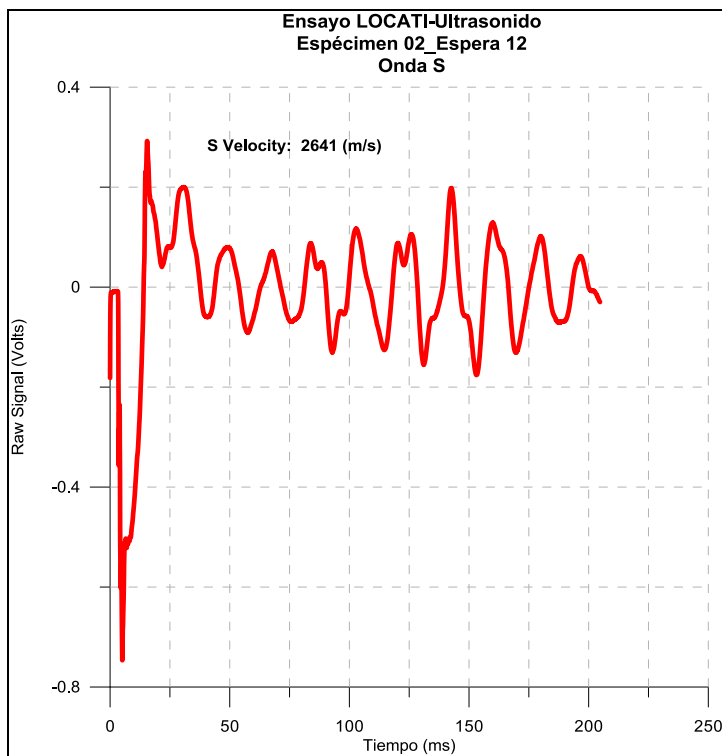


Figura 231 Onda S, espécimen 2\_espera 12. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

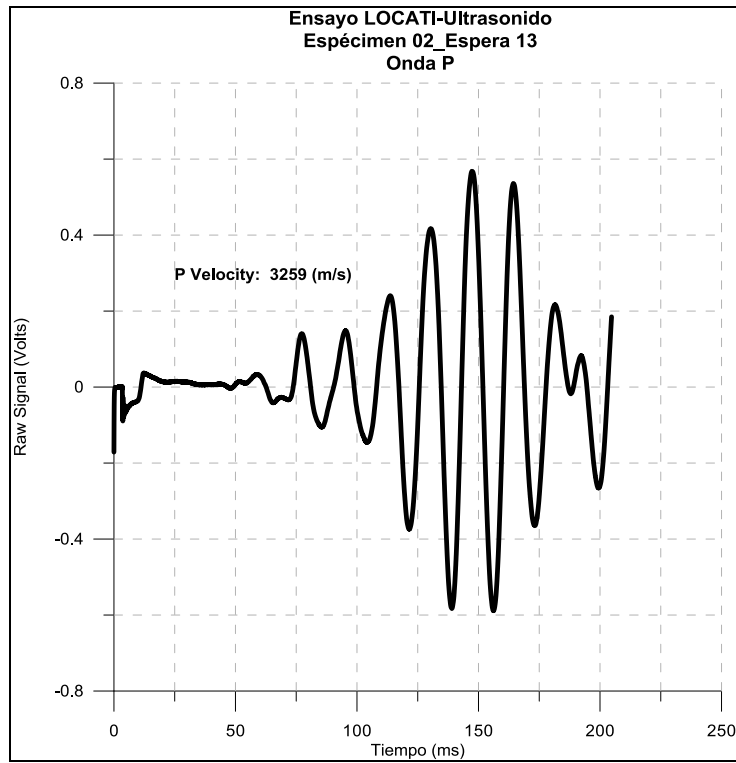


Figura 232 Onda S, espécimen 2\_espera 13. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

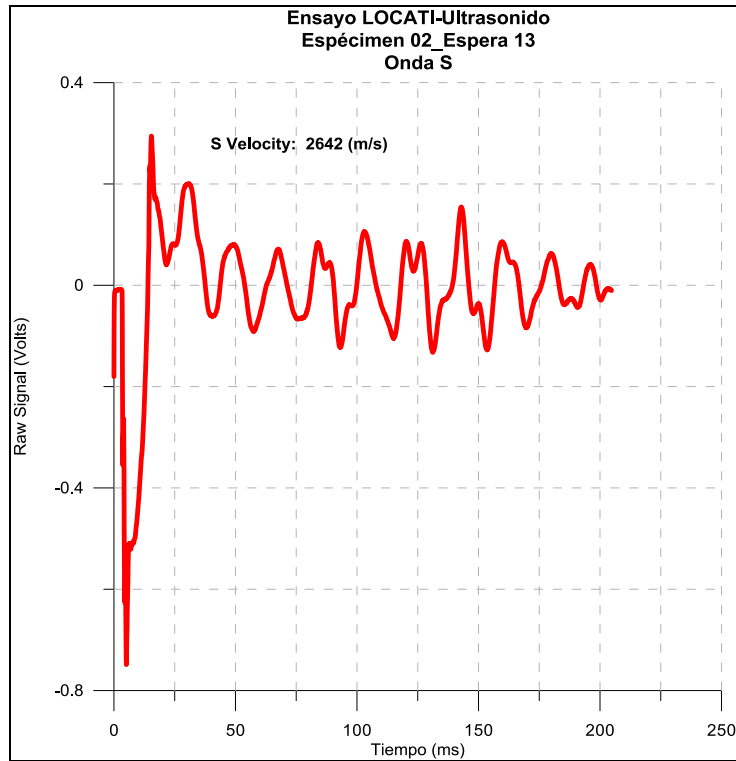


Figura 233 Onda S, espécimen 2\_espera 13. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

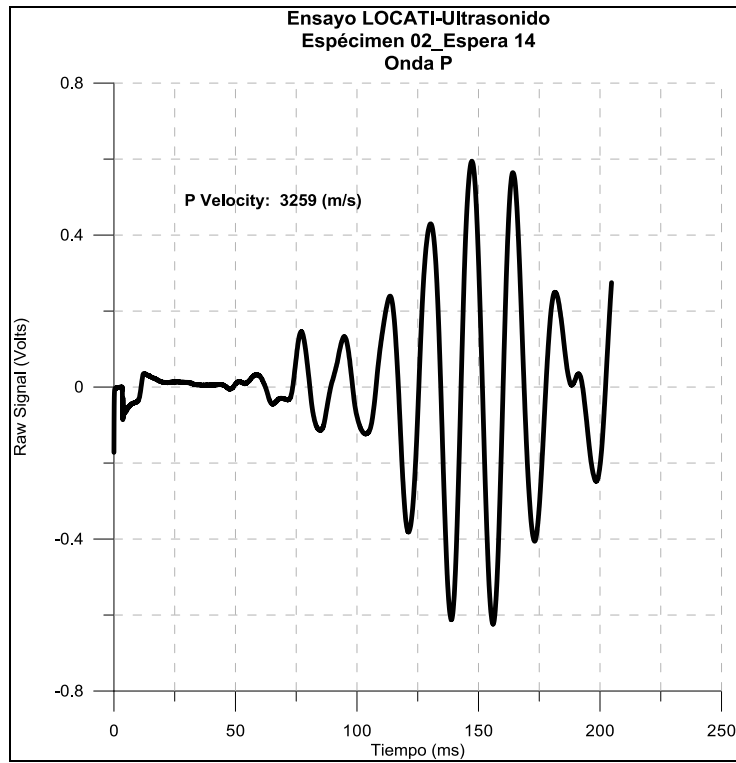


Figura 234 Onda P, espécimen 2\_espera 14. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

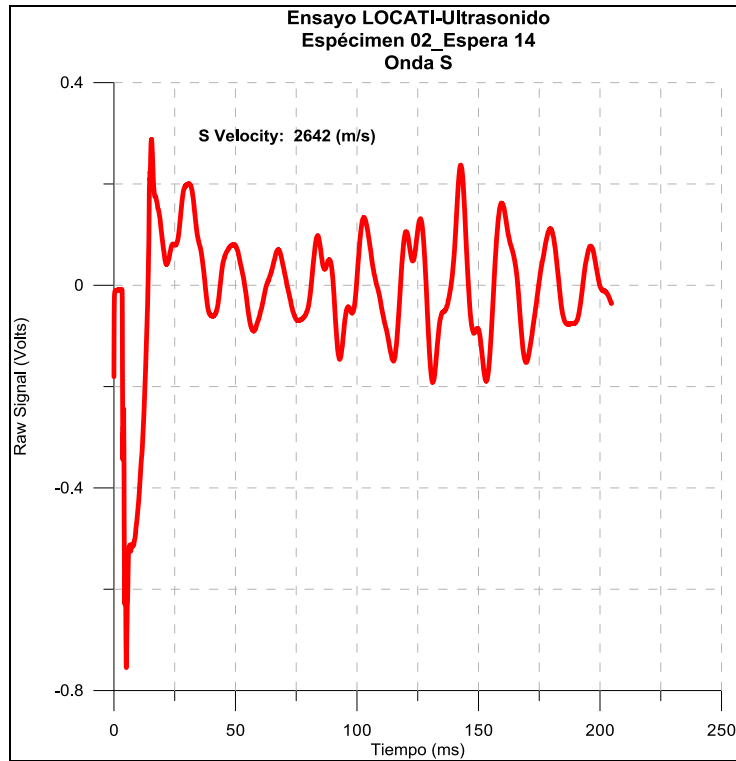


Figura 235 Onda S, espécimen 2\_espera 14. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

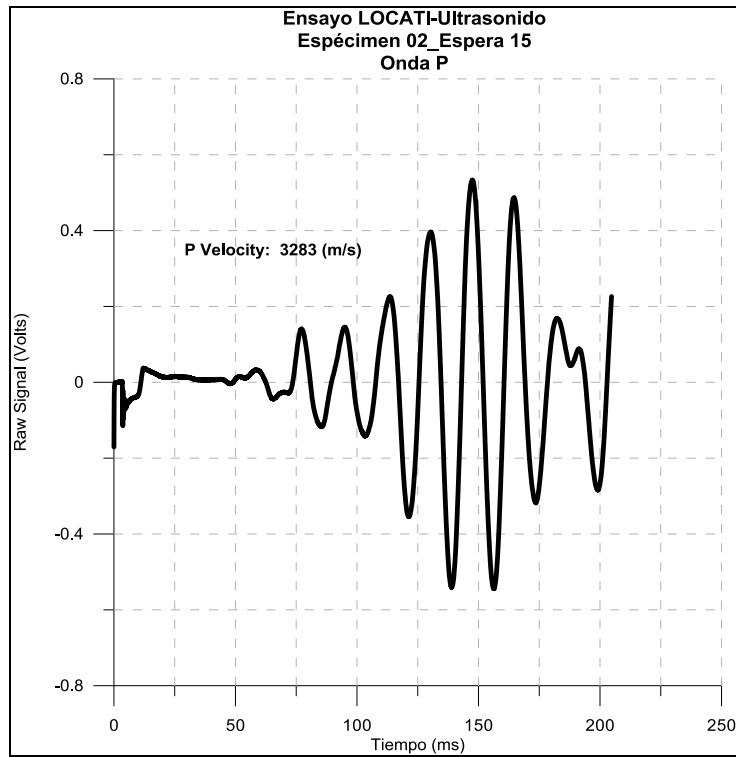


Figura 236 Onda P, espécimen 2\_espera 15. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

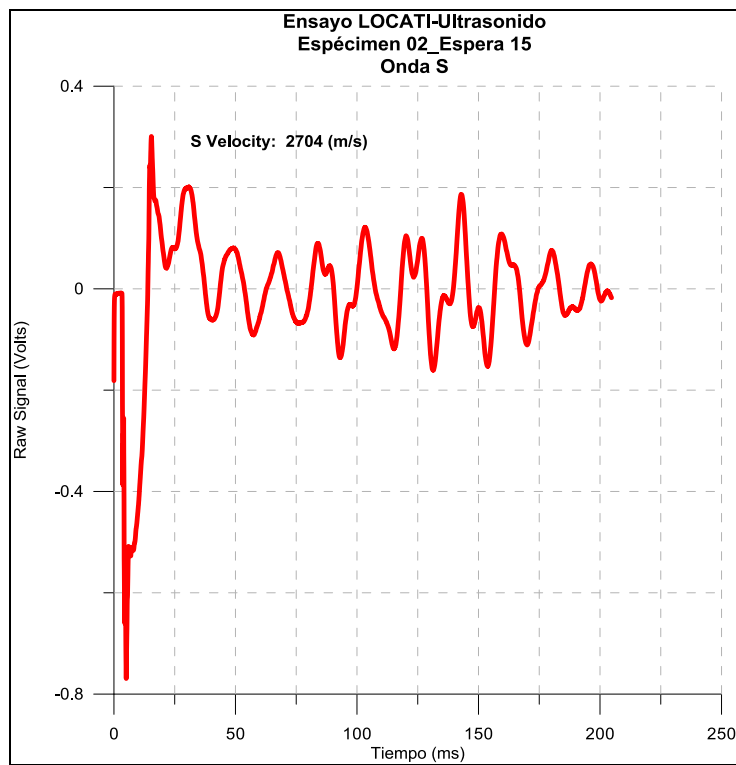


Figura 237 Onda S, espécimen 2\_espera 15. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

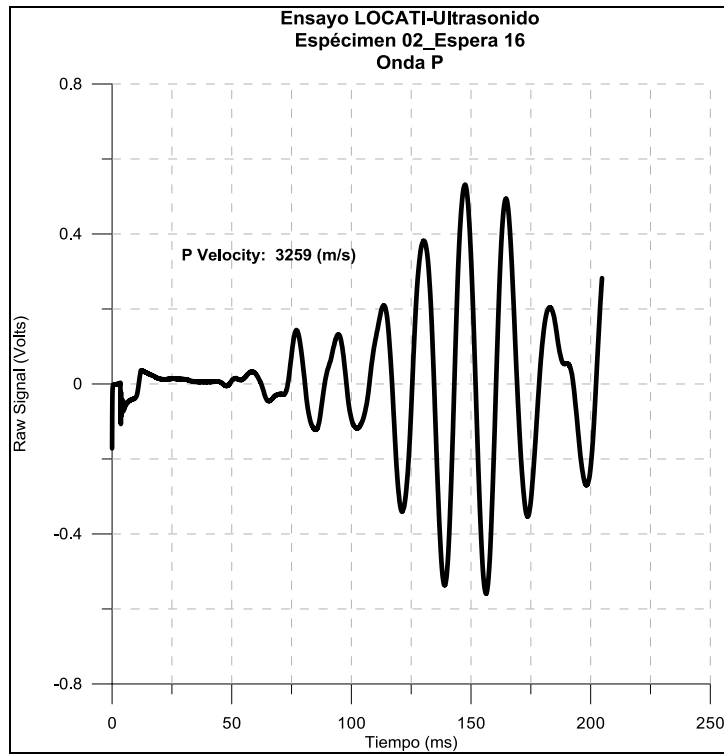


Figura 238 Onda P, espécimen 2\_espera 16. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

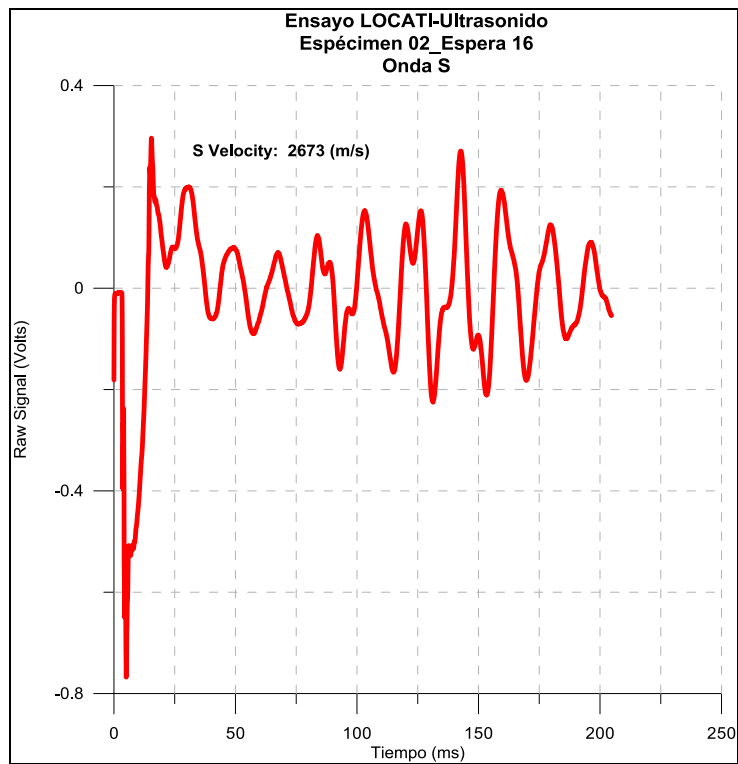


Figura 239 Onda S, espécimen 2\_espera 16. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

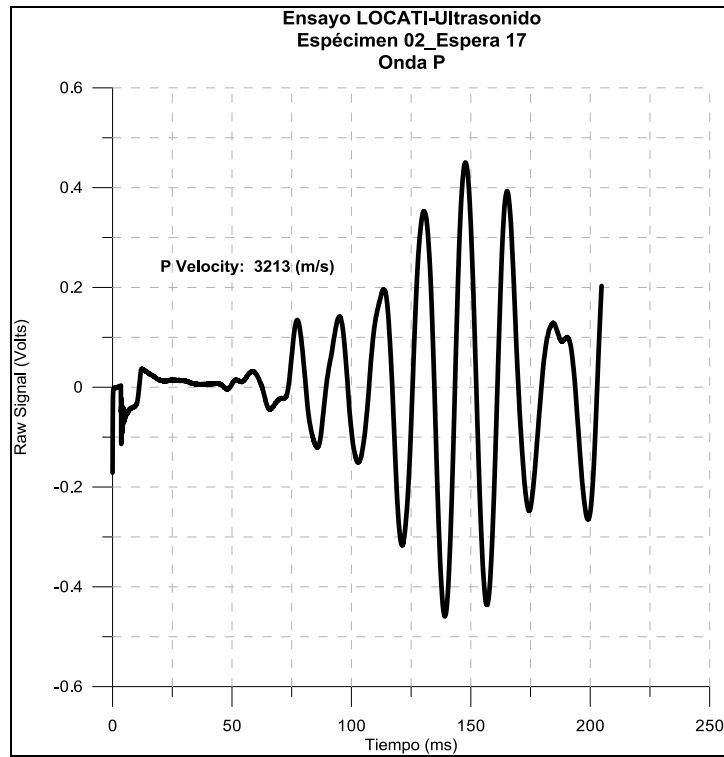


Figura 240 Onda P, espécimen 2\_espera 17. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

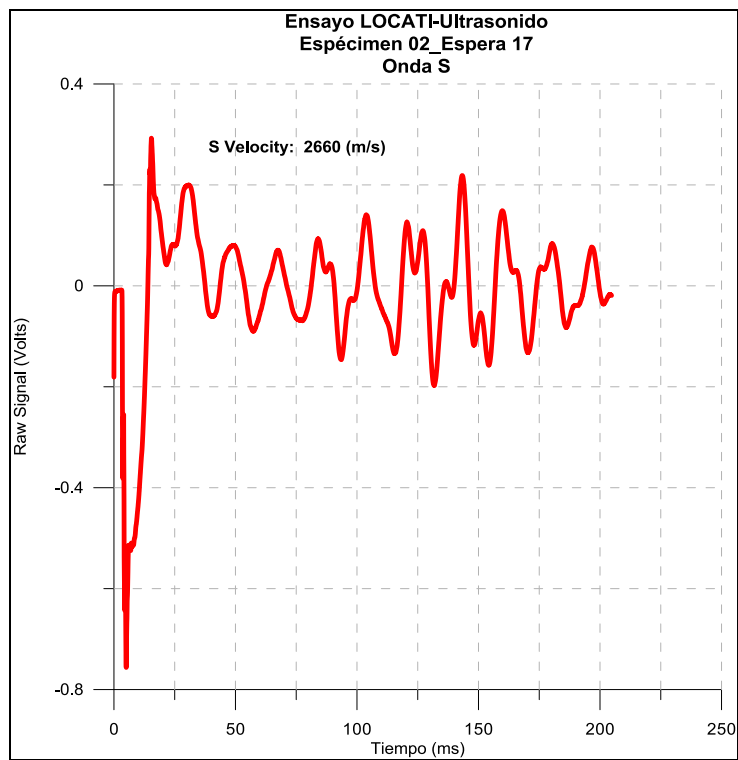


Figura 241 Onda S, espécimen 2\_espera 17. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia



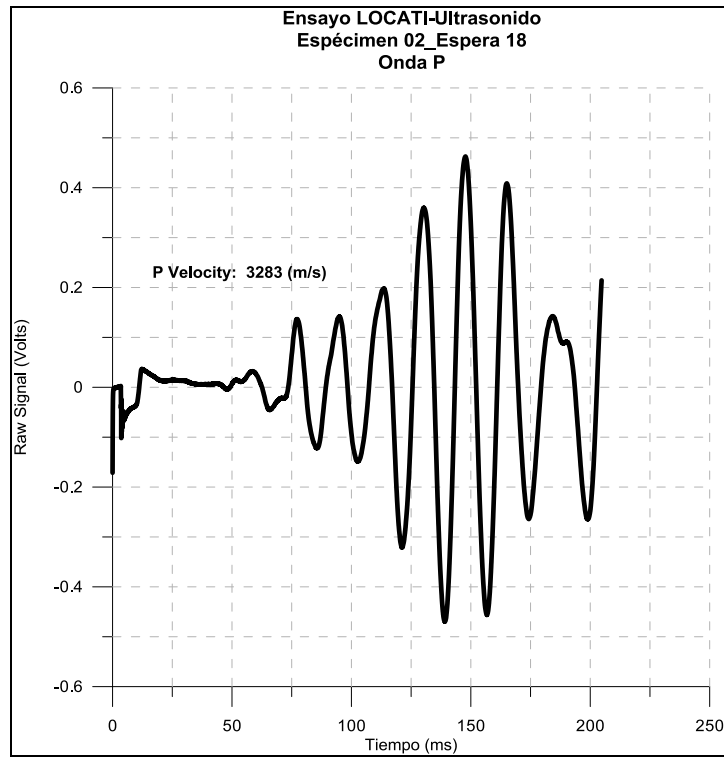


Figura 242 Onda P, espécimen 2\_espera18. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

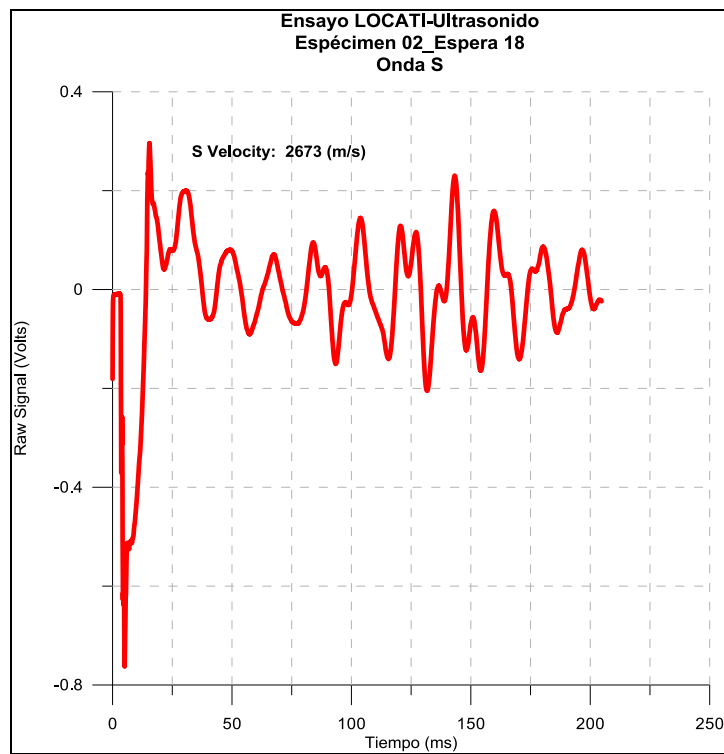


Figura 243 Onda S, espécimen 2\_espera 18. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

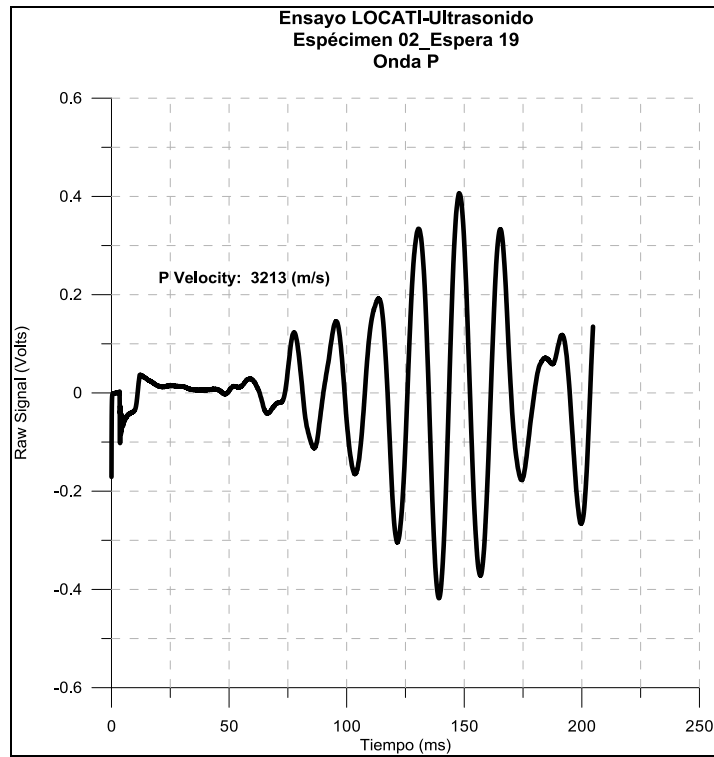


Figura 244 Onda P, espécimen 2\_espera 19. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

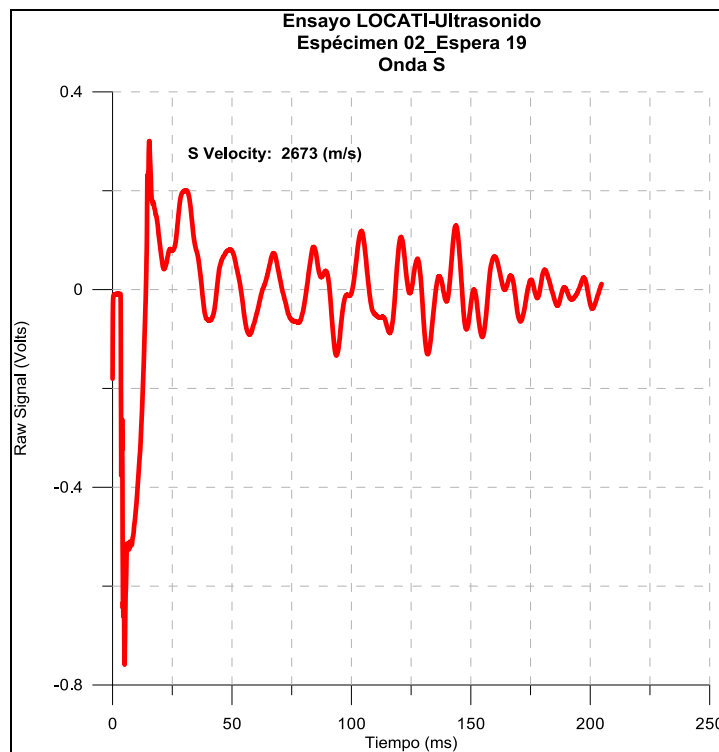


Figura 245 Onda S, espécimen 2\_espera 19. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

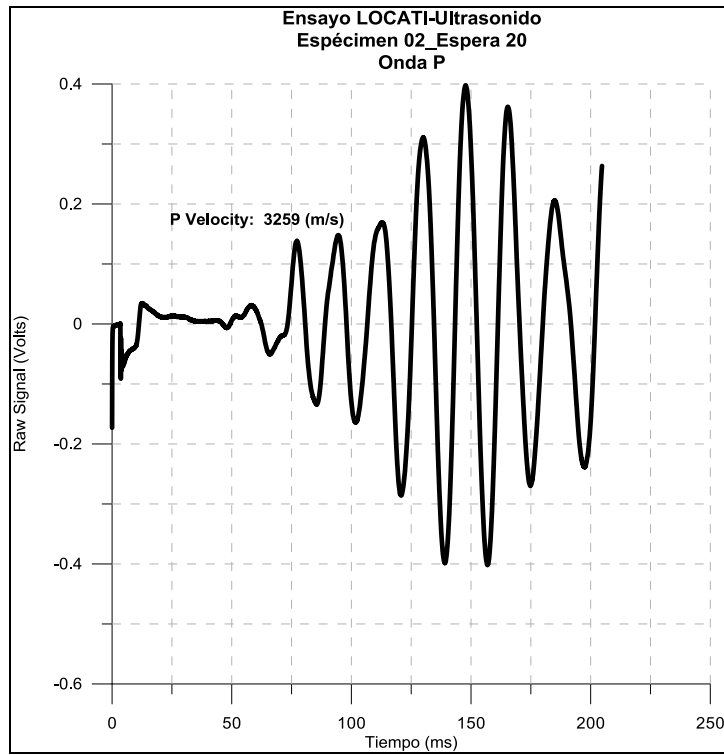


Figura 246 Onda P, espécimen 2\_espera 20. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

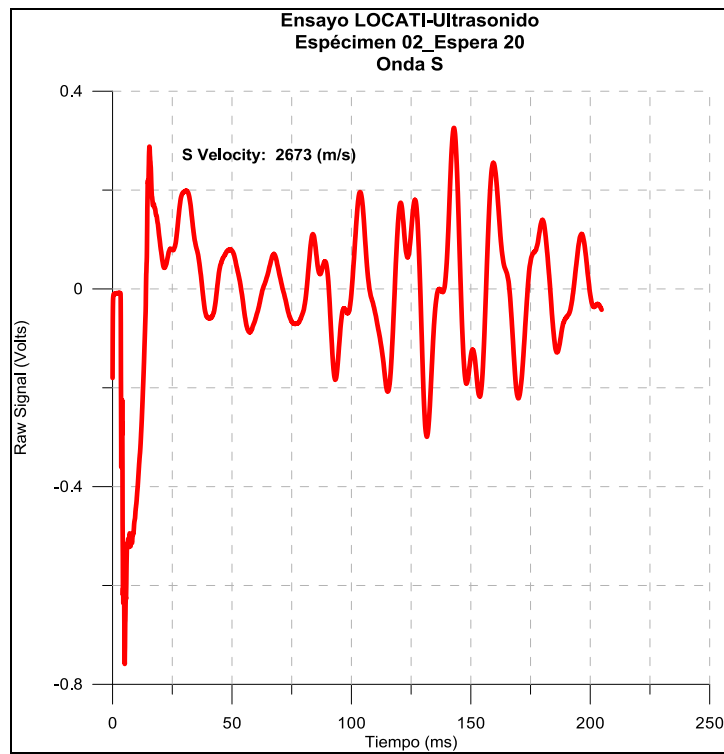


Figura 247 Onda S, espécimen 2\_espera 20. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

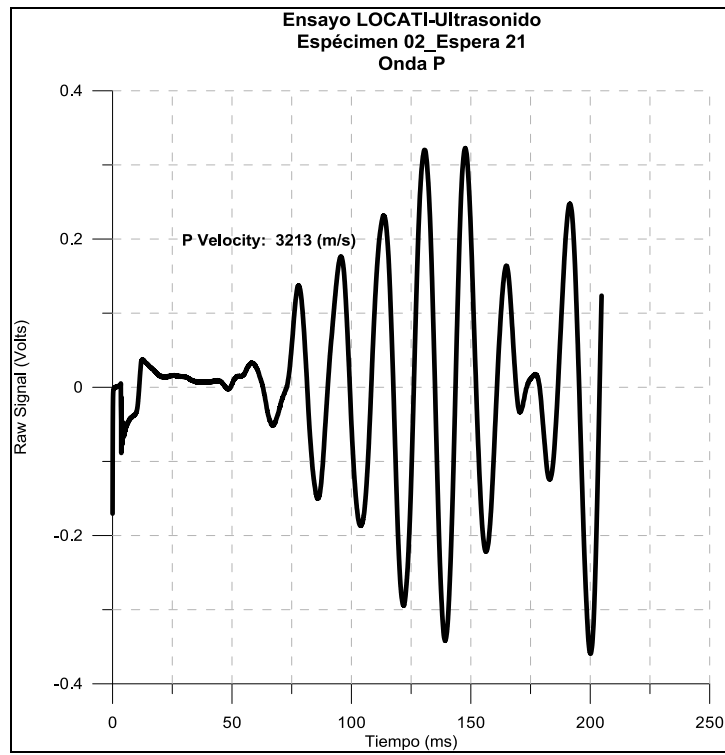


Figura 248 Onda P, espécimen 2\_espera 21. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

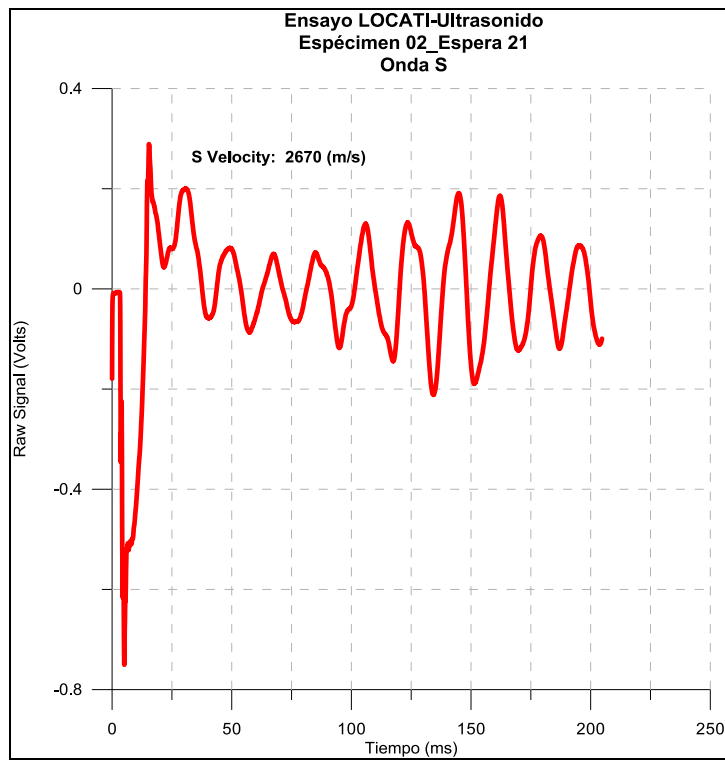


Figura 249 Onda S, espécimen 2\_espera 21. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

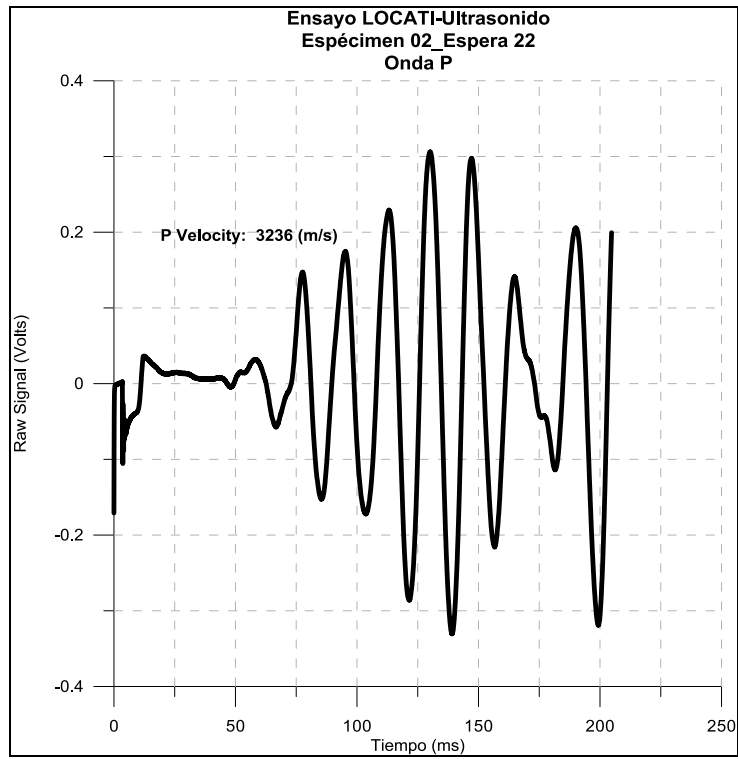


Figura 250 Onda P, espécimen 2\_espera 22. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

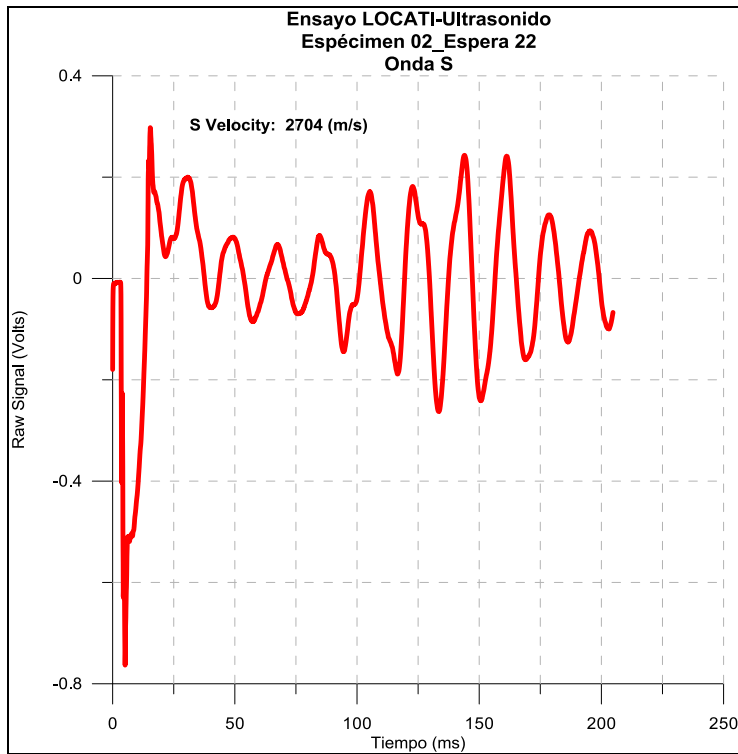


Figura 251 Onda S, espécimen 2\_espera 22. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

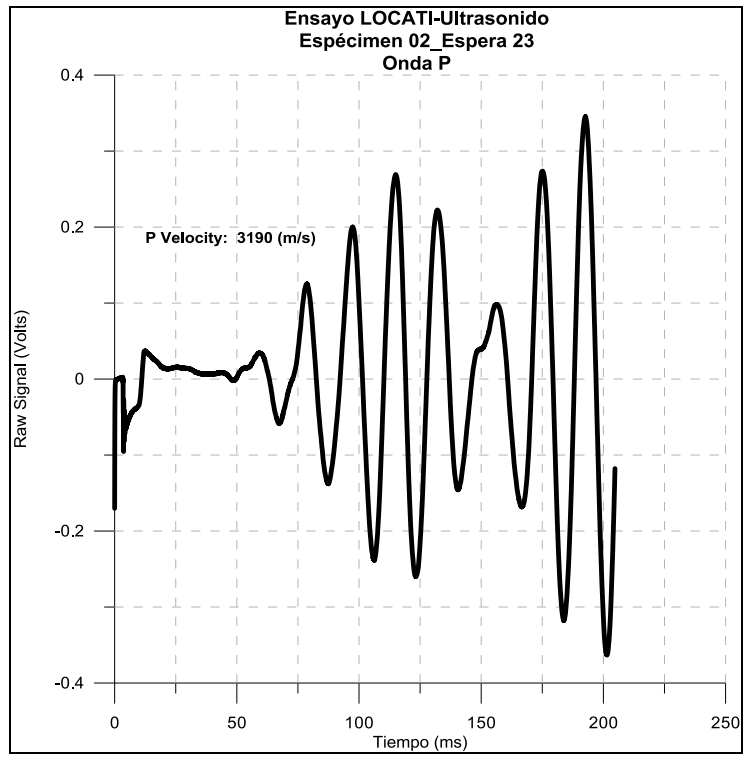


Figura 252 Onda P, espécimen 2\_espera 23. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

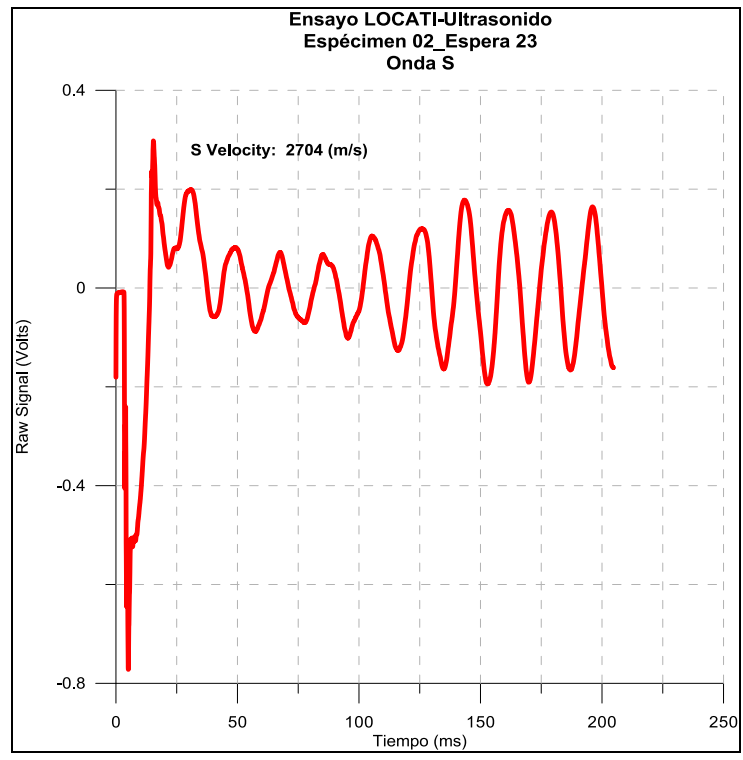


Figura 253 Onda S, espécimen 2\_espera 23. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

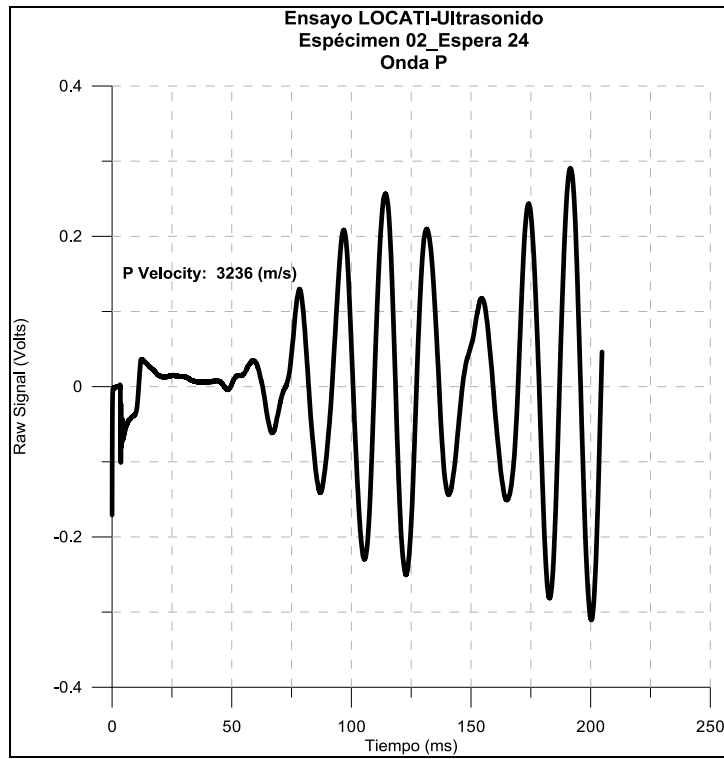


Figura 254 Onda P, espécimen 2\_espera 24. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

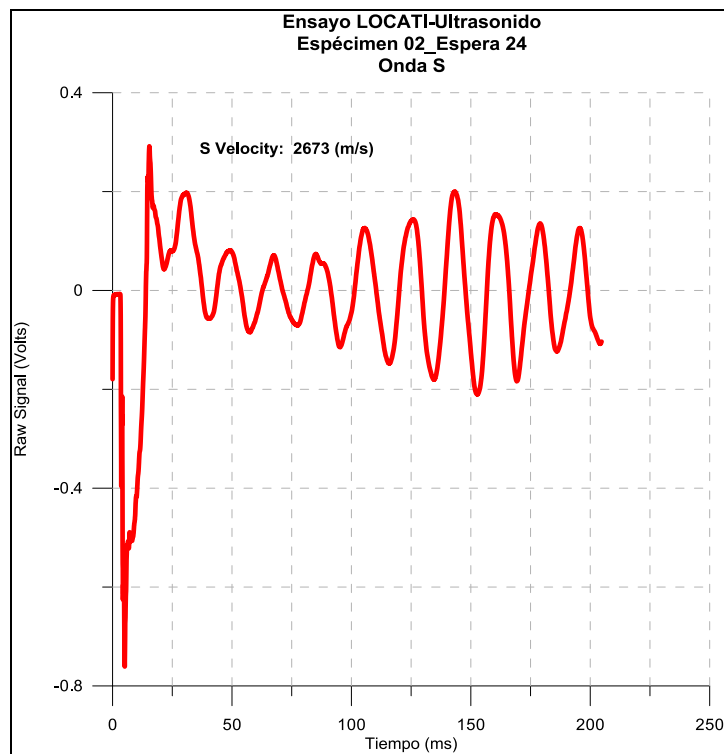


Figura 255 Onda S, espécimen 2\_espera 24. Ensayo LOCATI-Ultrasonido. Elaboración propia

## APENDICE II:

### II.1 Descripción y especificaciones del programa utilizado para la realización de los ensayos

Para la ejecución de los ensayo se realizó una programación de tipo universal la cual es especificada en la programación del equipo como “Modo de ensayo Universal”, así como también el ensayo de corte directo, los cuales vienen incorporados en los programas CGTS CATS para Windows. Las programaciones se encuentran de forma general para cada caso, sin embargo están incluidas diferentes opciones que se seleccionan dependiendo de los requerimientos.

El programa universal está constituido por numerosas fases independientes, con cada fase se tienen selecciones de duración independiente, adquisición de datos y almacenamiento, así como también selección de controles analógicos. Hay numerosas formas de onda que pueden ser ejecutadas en las salidas (analógicas o temperatura), con la retroalimentación para las salidas cambiables entre las fases.

Para especificar las características de los ensayos el programa cuenta con una serie de ventanas que permiten la selección.

II.1 Definición del programa: el programa Universal se divide en fases independientes, donde cada fase es un periodo de tiempo durante el cual se toman diferentes acciones.

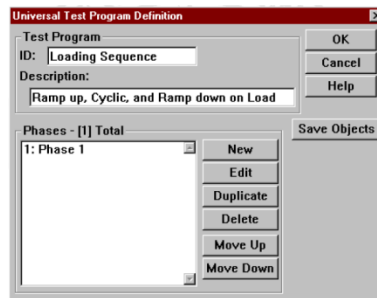


Figura 256 Definición del Programa Universal. (Manual del Usuario&Referencia CATS Universal)

II.2 Selección de objetos a almacenar: es la opción que tiene el usuario para especificar que parámetros quiere almacenar durante la ejecución del ensayo.



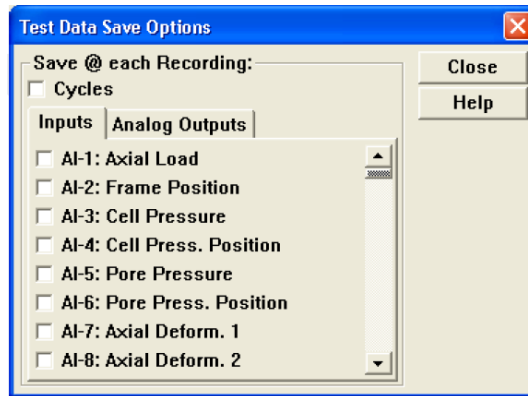


Figura 257 Ventana de selección de objetos a almacenar. (Manual del Usuario&Referencia CATS Universal)

II.2 Fases del Programa Universal: Dentro de cada fase se pueden establecer diferentes tiempos de duración y almacenamientos de datos, así como también se pueden definir diferentes estados de salidas (analógicas o digitales).

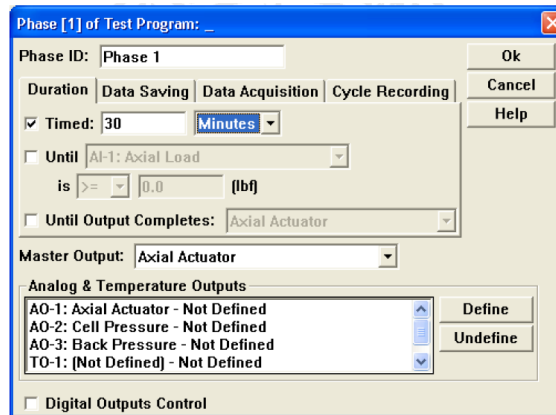


Figura 258 Ventana de definición de fases. (Manual del Usuario&Referencia CATS Universal)

II.3 Fase del almacenamiento de datos: fase en la cual se especifica el tiempo en el cual el equipo almacena los datos del ensayo.

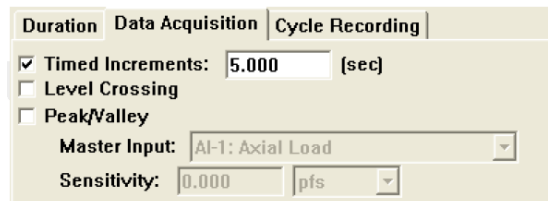


Figura 259 Selecciones de la adquisición de datos. Manual del Usuario&Referencia CATS Universal)<sup>10</sup>

<sup>10</sup> La totalidad de las especificaciones se encuentran en el GCTS-CATS. Manual del Usuario&Refencia. Este Apéndice II está elaborado con la finalidad de proporcionarle al lector una

## APENDICE III:

### III.1 Programa RocLab

El programa RocLab es de libre distribución y se puede descargar del sitio de internet de Rocscience ([www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)).

RocLab es un programa de computación que permite determinar los parámetros de resistencia del macizo rocoso, de acuerdo al criterio de rotura generalizado de Hoek-Brown. RocLab es un producto de libre distribución desarrollado por Rocscience Inc.

El programa RocLab proporciona una puesta a punto sencilla e intuitiva del criterio de rotura de Hoek-Brown, que permite al usuario una fácil obtención de estimaciones fiables de propiedades del macizo rocoso, así como también la visualización de los efectos que el cambio de parámetros del macizo rocoso produce sobre la envolvente de rotura.

La tarea de determinar propiedades del macizo rocoso no es normalmente un fin en sí mismo. Esta tarea se realiza para proporcionar datos de entrada a los programas de análisis numérico, que requieren definición de las propiedades del material para ejecutar cálculos de estabilidad o análisis de tensiones.

Las propiedades determinadas por RocLab se pueden emplear como datos de entrada en programas de análisis numérico tales como Phase2 (análisis de elementos finitos y diseño de soportes para excavaciones) o Slide (análisis de estabilidad de taludes mediante equilibrio límite).

Los cálculos del programa RocLab se basan en la última versión del criterio de rotura generalizado de Hoek-Brown.

### III.2 Parámetros de selección para el uso del programa RocLab.

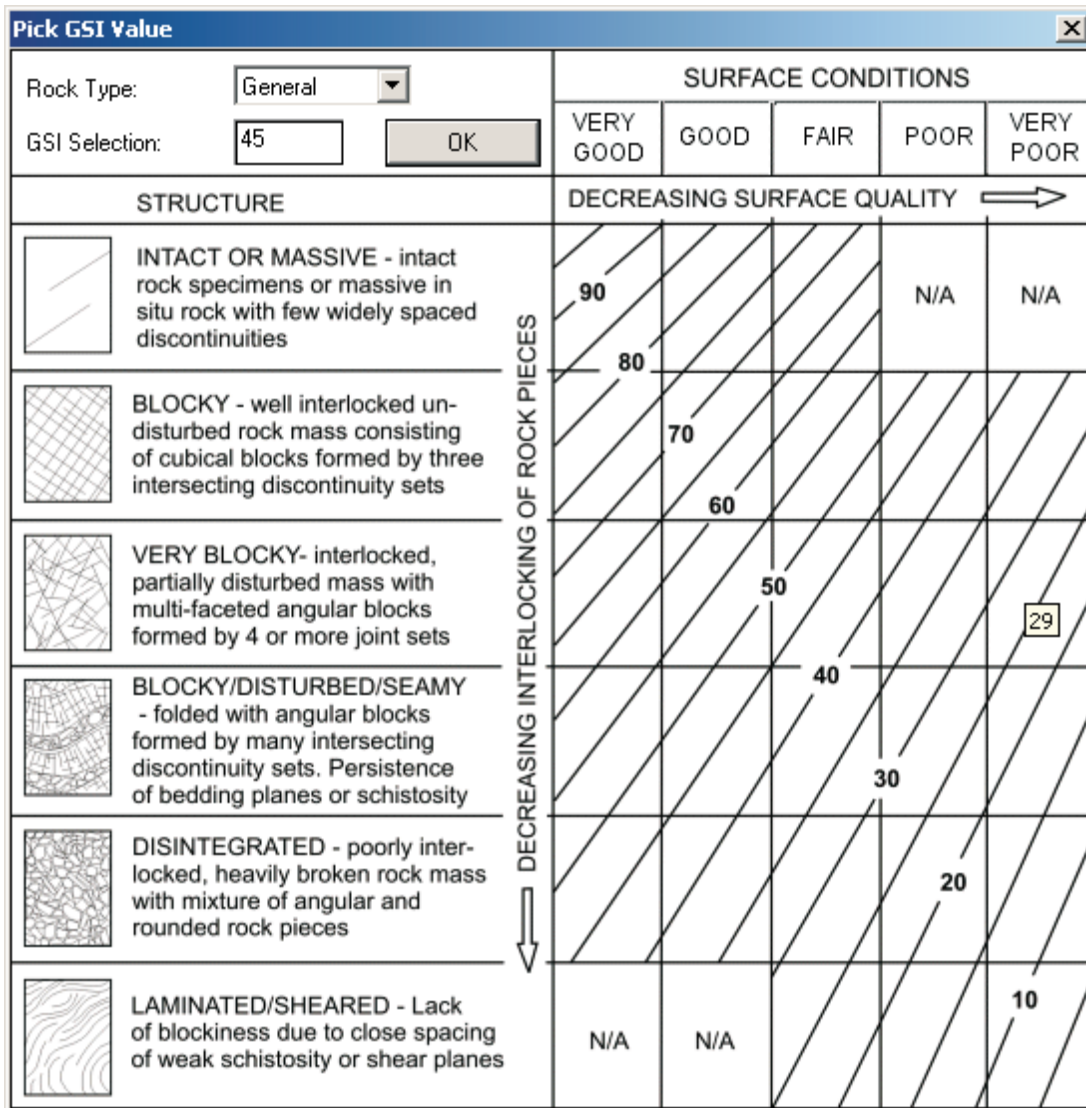


Figura 260 Diagrama de clasificación del GSI; para un tipo de roca general.

Se podrá observar que existen dos diagramas de GSI diferentes:

- Un diagrama para tipos generales de macizos rocosos.
- Otro diagrama para tipos de macizos rocosos homogéneos y débiles tales como el flysch, que extienden el rango de validez de GSI hasta valores tan bajos como 5.

Field Estimate of Strength	Examples	Strength (MPa)
Specimen can only be chipped with a geological hammer.	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite.	>250
Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it.	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff.	100-250
Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it.	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale.	50-100
Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone.	25-50
Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer.	Chalk, rocksalt, potash.	5-25
Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife.	Highly weathered or altered rock.	1-5
Indented by thumbnail.	Stiff fault gouge.	0.25-1

Uniaxial Compressive Strength (sigci):  MPa

Figura 261 Ventana para seleccionar valores de resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

Esta ventana se encuentra integrada en el programa RovLab para seleccionar el sigci dependiente del tipo de roca. Estos valores son referenciales por lo cual pueden ser ajustados dependiendo del material.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.</p>	<p>D=0</p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo circundante.</p> <p>Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloquen una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la figura.</p>	<p>D=0</p> <p>D=0.5 No invert</p>
	<p>Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3m en el macizo rocoso circundante.</p>	<p>D=0.8</p>
	<p>Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensión resulta en alguna alteración.</p>	<p>D=0.7 Good blasting</p> <p>D=1.0 Poor blasting</p>
	<p>Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento.</p> <p>En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.</p>	<p>D=1.0 Production blasting</p> <p>D=0.7 Mechanical excavation</p>

Figura 262 Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, D. (Hoek, Carranza Torres, & Corkum, 2002)

## APENDICE IV

### IV.1 Unidades de conversión utilizadas

$$1\text{kN} = 101,97 \text{ kgf}$$

$$1\text{kPa} = 0,010197 \text{ kgf/cm}^2$$

$$1\text{MPa} = 10,197 \text{ kgf/cm}^2$$

$$1\text{ms} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$1\mu\text{s} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$