

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE ESPECÍMENES
DE SUELO MEDIANTE EL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

ING. MIRIAM
SANTIAGO GARCÍA

2023



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE
ESPECÍMENES DE SUELO MEDIANTE EL ANÁLISIS
EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias en Geotecnia

Presenta

Ing. Miriam Santiago García

Dirigido por

Dr. Omar Chavez Alegría

Co-Director

Dr. José Manuel Machorro López

Querétaro, Qro., a 1 de mayo de 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Determinación de las propiedades de especímenes de
suelo mediante el análisis experimental de la
velocidad de pulso ultrasónico

por

Miriam Santiago García

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](#).

Clave RI: IGMAC-302335



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias en Geotecnia

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE ESPECÍMENES DE
SUELO MEDIANTE EL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias en Geotecnia

Presenta

Ing. Miriam Santiago García

Dirigido por

Dr. Omar Chávez Alegría

Co-Director

Dr. José Manuel Machorro López

Dr. Omar Chávez Alegría

Presidente

Dr. José Manuel Machorro López

Secretario

Dr. Eduardo Rojas González

Vocal

Dr. Jesús Pacheco Martínez

Suplente

Dra. Ma. De la Luz Pérez Rea

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Mayo de 2023

México

RESUMEN

El estudio de los suelos es un componente esencial en la construcción de la infraestructura de una ciudad, por lo que debe ser un estudio exhaustivo que describa con la mayor precisión posible el área donde se llevará a cabo la construcción. La rama de la ingeniería civil conocida como geotecnia estudia cómo se comportan diversos suelos y rocas en diversas situaciones y condiciones de forma rápida y de bajo costo. Actualmente una de las alternativas más utilizadas es el uso de métodos indirectos que permitan conocer, determinar y comprender al subsuelo. Los métodos no destructivos, son métodos que se aplican al objeto en estudio que como su nombre lo indica, no invaden ni destruyen químicamente ni físicamente al objeto, además de ser métodos fáciles, en cuestiones de aplicación, con resultados confiables, rápidos y de bajo costo.

Hoy en día los métodos geofísicos, son el ejemplo de este tipo de métodos, utilizados para determinar anomalías en el subsuelo y/o de forma previa a los estudios geotécnicos para una mejor optimización de tiempo y recursos. Sin embargo, existe una gran variedad de métodos no destructivos que tienen un potencial para ser aplicados a la geotecnia.

En esta investigación, se realizaron experimentos con el método no destructivo denominado Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU), que se basa en el uso de ondas sonoras que viajan a través del objeto en estudio, permitiendo conocer la calidad y/o el estado del objeto.

Esta investigación tiene como propósito mostrar el proceso de aplicación del método VPU para tres tipos de suelo (limo (ML), arena limosa (SM) y grava limosa (GM)) con la finalidad de mostrar la metodología y esta pueda ser reproducida en los diversos suelos que existen, debido a que no existe una norma para el uso del método VPU para suelos.

Finalmente, con la experimentación realizada, en cada fase de este trabajo, se presentan ecuaciones empíricas lineales y parabólicas que, principalmente muestran el comportamiento de la velocidad del pulso ultrasónico en los tres tipos de suelo usando como variables: el peso volumétrico de la muestra, la humedad, el uso de revestimiento para las muestras.

Las ecuaciones demuestran que se puede determinar el peso volumétrico a partir de la velocidad del pulso ultrasónico de un suelo limoso (ML) con una humedad menor al 1.5% en muestras cilíndricas con un diámetro de 37 mm y longitudes de 18 mm, 37 mm, 74 mm y 95 mm, así como para un suelo areno limoso (SM) con humedad óptima con muestras cilíndricas con un diámetro de 37 mm y una longitud de 74 mm. Por otra parte, para el suelo clasificado

como grava limosa (GM), se observó no es posible el uso de este método debido a la inestabilidad que presentan las muestras para llevar a cabo la prueba.

Aunado a lo anterior, se presentan ecuaciones empíricas que muestran el comportamiento entre la resistencia al corte de muestras de limo (ML) con la velocidad de pulso ultrasónico.

Con los resultados, se demuestra que el uso del método VPU es factible para su aplicación en la geotecnia. Alentando su uso en experimentaciones que impliquen diferentes tipos de suelos, para comprender de mejor forma el comportamiento de la velocidad del pulso ultrasónico con diversas condiciones del suelo.

Palabras clave: Método no destructivo, Velocidad de Pulso Ultrasónico, peso volumétrico, resistencia al corte, limo, arena, grava, ecuaciones empíricas.

SUMMARY

Soil investigation is an essential component in the construction of civil infrastructure, it must be a comprehensive study that describes with the greatest possible precision the area where construction will take place. The branch of civil engineering known as geotechnical engineering studies the behavior of various soils and rocks in diverse situations and conditions quickly and inexpensively. Currently one of the most used alternatives is the use of indirect methods that can know, determine and understand soils. Non-destructive methods are methods that are applied to the studied object and, as its name indicates, are not invasive and do not chemically or physically destroy the object. Additionally, these are easy methods, in matters of application, with reliable, fast and low-cost results.

Today geophysical methods are an example of this type of method, used to determine anomalies in the subsoil and/or used prior to geotechnical studies for a better optimization of time and resources. However, there is a wide variety of non-destructive methods that have the potential to be applied to geotechnical engineering.

In this investigation, experiments were carried out with the non-destructive method called Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), which is based on the use of sound waves that travel through the object under study, allowing to know the quality and/or state of the object.

The purpose of this research is to show the application process of the UPV method for three types of soil (silt (ML), silty sand (SM) and silty gravel (GM)) in order to show the methodology so it can be reproduced in the various soils that exist, because there is no standard for the use of the UPV method for soils.

Finally, with the performed experimentation, in each phase of this work, linear and parabolic empirical equations are presented that show the behavior of the speed of the ultrasonic pulse in the three types of soil using the following variables: the unit weight of the sample, moisture and the use of coating for the samples.

The equations demonstrate that the unit weight can be determined from the ultrasonic pulse velocity of a loamy soil (ML) with a water content less than 1.5% in cylindrical samples with a diameter of 37 mm and lengths of 18 mm, 37 mm, 74 mm and 95 mm, as well as for a silty sandy soil (SM) with optimal water content with cylindrical samples with a diameter of 37 mm and a length of 74 mm. On the other hand, for the soil classified as silty gravel (GM), it was

observed that the use of this method is not possible due to the instability that the samples present when performing the test.

In addition to the above, empirical equations are presented that show the behavior between the shear strength of silt samples (ML) with the speed of the ultrasonic pulse.

With these results, it is shown that the use of the UPV method is feasible for its application in geotechnical engineering. Its use in experiments involving different types of soils is encouraged, to better understand the behavior of the ultrasonic pulse velocity with various soil conditions.

Keywords: Non-destructive methods, Ultrasonic Pulse Velocity, Unit Weight, Shear strength, silt, sand, gravel, empirical equations.

DEDICATORIA

A mi familia

A mis padres y a mis hermanas,

Porque a pesar de estar lejos, siempre tuve su apoyo incondicional,

Por sus ánimos y bendiciones,

Por sus palabras de aliento,

Por nunca me dejaron rendirme,

Por su amor, cariño y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre Sixto Santiago Ramírez, quien dio origen a mi amor por las matemáticas y quien se convirtió en la persona que me mostró este camino, porque por el todo comenzó, por brindándome un apoyo incondicional y sirviendo como un ejemplo de integridad. Estoy muy agradecida por su apoyo incondicional.

A mi madre, María Asunción, por ser mi mejor amiga, por estar siempre ahí para escucharme y aconsejarme, y por ser mi ejemplo a seguir al demostrar que, a pesar de los desafíos de este mundo, si uno actúa desde el corazón, Dios recompensará esa acción. Por ser la mejor madre que pude haber tenido

A mi hermana Ruth, un ejemplo de la fortaleza de la familia. Por ser la persona en quien puedo tener plena fe, por darme buenos consejos, por ser mi amiga, por escucharme siempre, por nunca juzgarme y por tener la sabiduría para levantarme cada vez que me caigo y hacer que regrese con más fuerza. Porque siempre te admirare y siempre serás mi modelo a seguir.

A mi hermana Vero y Gabi, porque me tuvieron demasiada paciencia en mis momentos de estrés, por los momentos bonitos que me han brindado estos últimos años, por apoyarme cada que lo necesito, por perdonarme en las situaciones difíciles y estar siempre que pido su ayuda, porque a pasar de no entender nada de lo que les explicaba, escuchaban como hacia pastelitos de tierra. Mil gracias por ser mis hermanas.

A mi pequeña hermana Aida, por tu amistad, por todas las pláticas y mensajes que me hicieron olvidar por un momento soy un adulto y tengo responsabilidades. Por la confianza que has puesto en mí. Y a tu corta edad eres un ejemplo de dedicación y constancia. Agradezco a dios sea mi hermanita.

Agradezco a mi asesor, a mi director de tesis el Dr. Omar Chávez Alegría que, sin su orientación y apoyo no hubiera sido posible esta investigación. Por brindarme una idea que se fue desarrollando y evolucionando en esta investigación para brindar grandes resultados, por su paciencia, por el tiempo dedicado y por los consejos.

Agradezco al Dr. José Machorro López por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo la parte experimental, parte esencial en este trabajo. Por la dedicación y compromiso con la vida de la investigación y la innovación, por su constante atención a las necesidades del proyecto, y por su entrega en cada una de las revisiones.

Agradezco a los miembros de mi sínodo, el Dr. Eduardo Rojas González, Dr. Jesús Pacheco y la Dra. María de la Luz Pérez, por los valiosos comentarios y oportunas sugerencias para la mejorar esta investigación.

A mis compañeros de maestría, especial a David y Rafa, por su paciencia, por compartir parte de sus conocimientos, por sus explicaciones, por las pláticas en las que se ponía en duda todo y que gracias a ello pude tener un criterio más amplio.

A mis colegas, mis amigos de la maestría: Hurtado, Violeta, Horam y del trabajo: Magaly, Iván, Naye, gracias por hacer este camino más ameno, por los aminos, por los buenos momentos y por los consejos.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico, así como a la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindarme las herramientas necesarias para llevar a cabo el enriquecimiento de mis conocimientos en las aulas, crear y comprender nuevos comportamientos en su laboratorio de geotecnia.

Finalmente, me gustaría agradecer al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por permitirme utilizar sus instalaciones, equipos y conocimientos de científicos, ingenieros y técnicos que me permitieron llevar a cabo con éxito la experimentación con el método de velocidad de pulso de ultrasonido.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	I
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	9
1.1. JUSTIFICACIÓN	12
1.2. DESCRIPCIÓN DE PROBLEMA	13
2. HIPÓTESIS	14
3. OBJETIVOS.....	15
3.1. OBJETIVO GENERAL	15
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1. PROPIEDADES DE LOS SUELOS.....	16
4.1.1. Relaciones de volumen	17
4.1.2. Relaciones de peso	17
4.1.3. Límites de Atterberg (consistencia del suelo)	18
4.1.4. Carta de plasticidad.....	21
4.1.5. Clasificación de los suelos.....	22
4.1.6. Compactación.....	26
4.2. PROPIEDADES DE LAS ONDAS MECÁNICAS (ELÁSTICAS).....	27
4.2.1. Ondas	27
4.2.2. Características de las ondas	29
4.3. ONDAS SONORAS	32

4.4.	PRUEBA NO DESTRUCTIVA: VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	33
4.4.1.	Antecedentes.....	33
4.4.2.	Métodos de los ensayos no destructivos por ondas ultrasónicas	38
4.4.3.	Técnicas de los ensayos no destructivos por ultrasonido.....	41
4.4.4.	Transductores o palpadores (generadores del ultrasonido)	43
5.	METODOLOGÍA	48
5.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS.....	49
5.1.1.	Muestreo del suelo	49
5.1.2.	Caracterización geotécnica	55
5.2.	EQUIPO DEL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	65
5.2.1.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ULTRASÓNICO	66
5.2.2.	PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE VPU.....	67
5.3.	EQUIPO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE.....	71
5.3.1.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	71
5.3.2.	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	72
5.4.	EXPERIMENTACIÓN	75
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	81
6.1.	RESULTADOS DE LA FASE I	83
6.2.	RESULTADOS DE LA FASE II	93
6.3.	RESULTADOS DE LA FASE III	101
6.4.	RESULTADOS DE LA FASE IV.....	107
7.	CONCLUSIONES.....	115
8.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	117
9.	REFERENCIAS.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1 DIAGRAMA DE CONSISTENCIA DE SUELOS FINOS, DE ATTERBERG. FUENTE: GONZÁLEZ CABALLERO, M. (2004).....	19
TABLA 4.2 PLASTICIDAD DE UN SUELO RESPECTO AL ÍNDICE DE PLASTICIDAD. FUENTE: VILLALAZ, C. C. (2005).	21
TABLA 4.3 CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE ACUERDO A AASHTO, SUCS Y FAA. FUENTE: VILLALAZ, C. C. (2005).	25
TABLA 5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL Y LOCALIZACIÓN DE LOS BANCOS DE MATERIALES. FUENTE: SCT, 2022.	54
TABLA 6.1 PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS MATERIALES.....	81
TABLA 6.2 DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADA.	82
TABLA 6.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE PROBETAS DE LIMO (ML) CON UNA LONGITUD DE 18 MM.	83
TABLA 6.4 PROPIEDADES FÍSICAS DE PROBETAS DE LIMO (ML) CON UNA LONGITUD DE 37 MM.	84
TABLA 6.5 PROPIEDADES FÍSICAS DE PROBETAS DE LIMO (ML) CON UNA LONGITUD DE 74 MM.	84
TABLA 6.6 PROPIEDADES FÍSICAS DE PROBETAS DE LIMO (ML) CON UNA LONGITUD DE 95 MM.	84
TABLA 6.7 DATOS DE LAS PROBETAS DE LONGITUD DE 18 MM Y LAS LECTURAS DE LAS VELOCIDADES DE ARRIBO DE LA ONDA P.	87
TABLA 6.8 DATOS DE LAS PROBETAS DE LONGITUD DE 37 MM Y LAS LECTURAS DE LAS VELOCIDADES DE ARRIBO DE LA ONDA P.	87
TABLA 6.9 DATOS DE LAS PROBETAS DE LONGITUD DE 74 MM Y LAS LECTURAS DE LAS VELOCIDADES DE ARRIBO DE LA ONDA P.	87
TABLA 6.10 DATOS DE LAS PROBETAS DE LONGITUD DE 95 MM Y LAS LECTURAS DE LAS VELOCIDADES DE ARRIBO DE LA ONDA P.	88
TABLA 6.11 VALORES DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P OBTENIDOS A PARTIR DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN.....	91

TABLA 6.12 VARIACIONES EN PORCENTAJE ENTRE LAS VELOCIDADES.	92
TABLA 6.13 PROPIEDADES FÍSICAS DE PROBETAS DE ARENA LIMOSA (SM) CON UNA LONGITUD DE 74 MM.	94
TABLA 6.14 PROPIEDADES FÍSICAS DE PROBETAS DE ARENA LIMOSA (SM) CON UNA LONGITUD DE 95 MM.	94
TABLA 6.15 DATOS DE LAS PROBETAS DE LONGITUD DE 74 MM DE ARENA LIMOSA (SM) Y LAS LECTURAS DE LAS VELOCIDADES DE ARRIBO DE LA ONDA P.	97
TABLA 6.16 DATOS DE LAS PROBETAS DE LONGITUD DE 95 MM DE ARENA LIMOSA (SM) Y LAS LECTURAS DE LAS VELOCIDADES DE ARRIBO DE LA ONDA P.	98
TABLA 6.17 PROPIEDADES FÍSICAS DE PROBETAS DE GRAVA LIMOSA (GM) CON UNA LONGITUD DE 74 MM.	102
TABLA 6.18 PROPIEDADES FÍSICAS DE PROBETAS DE GRAVA LIMOSA (GM) CON UNA LONGITUD DE 95 MM.	102
TABLA 6.19 DATOS DE LAS PROBETAS DE LONGITUD DE 74 MM DE GRAVA LIMOSA Y GRÁFICO ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA VELOCIDAD DE LA ONDA P.	103
TABLA 6.20 LECTURAS OBTENIDAS EN LA PRUEBA DE VPU EN PROBETAS DE LIMO (ML) DE 74 MM CON UNA HOJA DE ACETATO COMO ENVOLVENTE.	105
TABLA 6.21 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE LIMO (ML) DE 18 MM DE LONGITUD QUE SE SOMETIERON A LA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE.	109
TABLA 6.22 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE LIMO (ML) DE 37 MM DE LONGITUD QUE SE SOMETIERON A LA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE.	110
TABLA 6.23 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE LIMO (ML) DE 74 MM DE LONGITUD QUE SE SOMETIERON A LA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE.	111
TABLA 6.24 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE LIMO (ML) DE 95 MM DE LONGITUD QUE SE SOMETIERON A LA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE.	112
TABLA 6.25 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE ARENA LIMOSA (SM) DE 74 MM DE LONGITUD QUE SE SOMETIERON A LA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE.	113
TABLA 6.26 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE ARENA LIMOSA (SM) DE 95 MM DE LONGITUD QUE SE SOMETIERON A LA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE.	114

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4.1 (A) ELEMENTO DE SUELO EN ESTADO NATURAL; (B) TRES FASES DEL ELEMENTO DE SUELO. FUENTE: DAS, B. M. (2015).	16
FIGURA 4.2 LÍMITE LÍQUIDO: A) COPA DE CASAGRANDE; B) CURVA DE FLUIDEZ. FUENTE: FERNÁNDEZ, J. A. G. (2017).....	20
FIGURA 4.3 PRUEBA DE LÍMITE PLÁSTICO, FORMACIÓN DE FILAMENTOS. FUENTE: PROPIA Y FERNÁNDEZ, J. A. G. (2017).....	20
FIGURA 4.4 CARTA DE PLASTICIDAD. FUENTE: DAS, B. M. (2015).	22
FIGURA 4.5 CLASIFICACIÓN POR EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO DE ACUERDO A LA COMISIÓN DEL RÍO MISSISSIPPI.	23
FIGURA 4.6 ONDA PRIMARIA, LONGITUDINAL O DE COMPRESIÓN. FUENTE: KRAUTKRÄMER, ET AL., (1990).....	28
FIGURA 4.7 ONDA SECUNDARIA, TRANSVERSAL O DE CORTE. FUENTE: KRAUTKRÄMER, ET AL., (1990).....	28
FIGURA 4.8 CICLO DE UNA ONDA. FUENTE: MODIFICADO DE RESNICK ET AL., 2004.	29
FIGURA 4.9 AMPLITUD DE UNA ONDA. FUENTE: MODIFICADO DE RESNICK ET AL., 2004..	30
FIGURA 4.10 LONGITUD DE ONDA. FUENTE: MODIFICADO DE RESNICK ET AL., 2004.	30
FIGURA 4.11 TIPO DE ONDAS SONORAS DE ACUERDO A SU FRECUENCIA.....	32
FIGURA 4.12 MÉTODO ULTRASÓNICO DE TRANSMISIÓN DIRECTA. FUENTE: GUERRA, J. L. (2018).	39
FIGURA 4.13 MÉTODO ULTRASÓNICO CON REFLEXIÓN. FUENTE: GUERRA, J. L. (2018).	40
FIGURA 4.14 ELEMENTOS DE UN TRANSDUCTOR NORMAL. FUENTE: MORA, A. F. (2010).	46
FIGURA 4.15 ELEMENTOS DE UN TRANSDUCTOR ANGULAR. FUENTE: MORA, A. F. (2010).	46
FIGURA 4.16 ELEMENTOS DE UN TRANSDUCTOR DE DOBLE CRISTAL. FUENTE: MORA, A. F. (2010).	47
FIGURA 5.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	49
FIGURA 5.2 ESTADO DE QUERÉTARO Y SUS COLINDANCIAS (INEI, 2021).	50

FIGURA 5.3 MAPA DE LAS PROVINCIAS GEOLÓGICAS EN MÉXICO. DE COLOR ROJO SE DISTINGUE LA FAJA VOLCÁNICA TRASMEXICANA Y EN COLOR ROSADO PASTEL SE DISTINGUE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL. FUENTE ORTEA ET AL. (1991).....	51
FIGURA 5.4 OBTENCIÓN DE UNA MUESTRA DE SUELO INALTERADA A TRAVÉS DE UN POZO A CIELO ABIERTO (PCA).	52
FIGURA 5.5 LOCALIZACIÓN DEL SONDEO DEL TIPO POZO A CIELO ABIERTO (PCA), EN EL MUNICIPIO DE PINAL DE AMOLES, QRO.	53
FIGURA 5.6 PROCESO PARA OBTENER EL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS MATERIALES.	57
FIGURA 5.7 PROCESO PARA OBTENER EL LÍMITE PLÁSTICO DE LOS MATERIALES.	58
FIGURA 5.8 PROCESO PARA OBTENER LA DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS A TRAVÉS DEL HIDRÓMETRO.	60
FIGURA 5.9 PROCESO PARA OBTENER LA DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS A TRAVÉS DE MALLAS.	61
FIGURA 5.10 PATRÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS GOLPES PARA LA COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADA. FUENTE: NORMA ASTM D1557-09.	63
FIGURA 5.11 PROCESO DE LA PRUEBA DE COMPACTACIÓN.....	64
FIGURA 5.12 INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE	66
FIGURA 5.13 EQUIPO USADO PARA LA PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO PERTENECIENTE AL IMT.....	67
FIGURA 5.14 CILINDRO DE CALIBRACIÓN. FUENTE: PROPIA.	69
FIGURA 5.15 PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y DESINTEGRACIÓN DE PROBETAS DE ARENA LIMOSA Y GRAVA LIMOSA.....	70
FIGURA 5.16 PRENSA PARA LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA O COMPRESIÓN SIMPLE EN EL LABORATORIO DE GEOTECNIA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO.	71
FIGURA 5.17 PROCESO DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE, MONTAJE, PRUEBA Y FALLA DE UNA PROBETA DE LIMO (ML).....	72
FIGURA 5.18 PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE. FUENTE: DAS, B (2013).	74
FIGURA 5.19 DIAGRAMA DEL PROCESO DE LA FASE I DE LA EXPERIMENTACIÓN. FUENTE: PROPIA.	76

FIGURA 5.20 PROBETAS CON DIFERENTES LONGITUDES Y PESO VOLUMÉTRICOS SECOS CON UNA HUMEDAD $\approx 0\%$	77
FIGURA 5.21 DIAGRAMA DEL PROCESO DE LA FASE II DE LA EXPERIMENTACIÓN. FUENTE: PROPIA.....	78
FIGURA 5.22 RECUBRIMIENTO DE LAS PROBETAS DE SUELO PARA EVITAR LA PÉRDIDA DE HUMEDAD.	79
FIGURA 5.23 RECUBRIMIENTO DE LAS PROBETAS DE GRAVA LIMOSA Y LIMO (ML) CON HOJAS DE ACETATO	80
FIGURA 6.1 CURVAS OBTENIDAS DE LA PRUEBA DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADA A) LIMO (MH); B) ARENA LIMOSA (SM); C) GRAVA LIMOSA (GM).	83
FIGURA 6.2 PROBETAS DE LIMO (ML) SOMETIDAS A LA PRUEBA DE VPU.	85
FIGURA 6.3 PROBETAS DE LIMO (ML) DESPUÉS DE RETIRAR LOS TRANSDUCTORES (PÉRDIDA DE LA SUPERFICIE PLANA DE LA PROBETA).....	86
FIGURA 6.4 GRÁFICO DE LA RELACIÓN ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA VELOCIDAD DE LA ONDA P PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 18 MM DE LONGITUD.....	88
FIGURA 6.5 GRÁFICO DE LA RELACIÓN ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA VELOCIDAD DE LA ONDA P PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 37 MM DE LONGITUD.....	89
FIGURA 6.6 GRÁFICO DE LA RELACIÓN ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA VELOCIDAD DE LA ONDA P PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 74 MM DE LONGITUD.....	89
FIGURA 6.7 GRÁFICO DE LA RELACIÓN ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA VELOCIDAD DE LA ONDA P PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 95 MM DE LONGITUD.....	90
FIGURA 6.8 COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P DE CADA UNA DE LAS PROBETAS CON LAS CUATRO LONGITUDES.	92
FIGURA 6.9 DESINTEGRACIÓN DE LAS PROBETAS DE GRAVA LIMOSA Y DE ARENA LIMOSA.	95
FIGURA 6.10 GRÁFICO DE LA RELACIÓN ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA VELOCIDAD DE LA ONDA P PARA PROBETAS DE ARENA LIMOSA (SM) DE 74 MM DE LONGITUD. ...	97
FIGURA 6.11 GRÁFICO DE LA RELACIÓN ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA VELOCIDAD DE LA ONDA P PARA PROBETAS DE ARENA LIMOSA (SM) DE 95 MM DE LONGITUD. ...	98

FIGURA 6.12 GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA P, PARA UN SUELO ARENA LIMOSO (SM) CON HUMEDAD ÓPTIMA Y VARIACIONES EN EL PESO VOLUMÉTRICO.....	100
FIGURA 6.13 A) GRÁFICA PRESENTADA POR SLAVOVA ET AL., 2010; B) GRÁFICA PRESENTADA POR KURTULUS ET AL., 2012.....	101
FIGURA 6.14 GRÁFICO DE LA RELACIÓN ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA VELOCIDAD DE LA ONDA P PARA PROBETAS DE GRAVA LIMOSA (GM) DE 74 MM DE LONGITUD..	104
FIGURA 6.15 PROCESO DE MEDICIÓN DE PROBETAS DE LIMO (ML) DE LONGITUD DE 74 MM, CON UNA HOJA DE ACETATO DE CONFINAMIENTO.....	105
FIGURA 6.16 GRÁFICO DE LAS VELOCIDADES PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 74 MM DE LONGITUD CON UNA HOJA DE ACETATO COMO CONFINAMIENTO.	106
FIGURA 6.17 PROBETAS DE LIMO (ML) CON LA MARCA DEL GEL ACOPLADOR EN LAS ÁREAS DE CONTACTO.....	107
FIGURA 6.18 GRÁFICO DE LA CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P Y LA RESISTENCIA AL CORTE PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 18 MM DE LONGITUD....	109
FIGURA 6.19 GRÁFICO DE LA CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P Y LA RESISTENCIA AL CORTE PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 37 MM DE LONGITUD....	110
FIGURA 6.20 GRÁFICO DE LA CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P Y LA RESISTENCIA AL CORTE PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 74 MM DE LONGITUD....	111
FIGURA 6.21 GRÁFICO DE LA CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P Y LA RESISTENCIA AL CORTE PARA PROBETAS DE LIMO (ML) DE 95 MM DE LONGITUD....	112
FIGURA 6.22 GRÁFICO DE LA CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P Y LA RESISTENCIA AL CORTE PARA PROBETAS DE ARENA LIMOSA (SM) DE 74 MM DE LONGITUD.	113
FIGURA 6.23 GRÁFICO DE LA CORRELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P Y LA RESISTENCIA AL CORTE PARA PROBETAS DE ARENA LIMOSA (SM) DE 95 MM DE LONGITUD.	114

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El comienzo de las civilizaciones trajo consigo el desarrollo de obras civiles. A medida que las ciudades se hacían más grandes y complejas, se hizo necesario realizar estudios preliminares de suelo para diseñar cimentaciones o estructuras adecuadas que cumplieran con los requisitos del proyecto de construcción. El objetivo de los estudios geotécnicos es conocer las características físicas y mecánicas de los suelos. Las propiedades mecánicas son las más significativas (resistencia, deformabilidad y permeabilidad), ya que se relacionan directamente con la creación de cimentaciones.

Debido a que los estudios geotécnicos de laboratorio requieren operaciones cuidadosas, equipos especializados y muestras representativas de suelo y/o roca (in situ o muestras inalteradas), la determinación de estas propiedades suele ser difícil, costosa y requiere mucho tiempo. (Dirección de Estudios y Proyectos, 1967) Esto ha llevado a los investigadores a buscar nuevas metodologías para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo que sean más fáciles de usar, más versátiles y más precisas en los resultados. Así, ha surgido una amplia gama de métodos que se basan en las propiedades físicas de los materiales, entre ellos, los métodos indirectos y no destructivos.

Algunos métodos indirectos ya se utilizan en la investigación geotécnica, por ejemplo, los métodos geofísicos (electromagnético, sísmico y magnético). Por otra parte, los métodos no destructivos, como los rayos catódicos, los rayos X, las corrientes de Eddy, las ondas ultrasónicas, entre otros, rara vez se han aplicado en la investigación geotécnica.

La velocidad del pulso ultrasónico es una prueba que utiliza ondas mecánicas (elásticas) que viajan a través de un material. El tiempo que tardan las ondas en viajar desde el transmisor hasta el receptor y la distancia entre ellos se utilizan para calcular la velocidad de las ondas (Arman, Khosravi, Osman y Alnaqbi, 2017). Las pruebas ultrasónicas se pueden utilizar directamente en un material determinado para examinar su estado físico externo o interno (Krautkrämer y Krautkrämer, 2013).

Los experimentos de detección de submarinos de la primera guerra mundial realizados por el físico francés Paul Langevin marcaron el comienzo del uso de ultrasonidos. Continuando con Leslie y Cheesman que desarrollaron su metodología entre 1945 y 1949 en Canadá, mientras que Jones y Gatfield también hicieron contribuciones significativas al mismo tiempo en Gran Bretaña (Céspedes García, 2003). Posteriormente, esta técnica fue utilizada en otros contextos con una variedad de propósitos, destacándose los siguientes:

En la aeronáutica se utilizó para buscar fracturas en superficies de materiales, medir el espesor de las tuberías y fisuras en el control de engranaje (Rimoldi y Mundo, 2010).

En el sistema de megafonía se usó para localizar barcos en el mar, sondear las profundidades del océano, así como para localizar bancos de peces (Krautkrämer y Krautkrämer, 2013).

En el campo de la medicina, las ondas ultrasónicas que pasan a través de un tejido dan como resultado un cambio en las características de las ondas como la longitud de onda, velocidad, amplitud, presión, frecuencia y el tiempo de llegada (Narouze, 2011) y, por lo tanto, se analizan para obtener las características del tejido.

En la ingeniería civil, las técnicas ultrasónicas se pueden aplicar tanto en condiciones in situ como en laboratorio, utilizándose comúnmente para establecer las propiedades físicas y mecánicas de suelos, rocas y concretos desde hace más de 60 años. (Rodrigues et al., 2003; el río et al., 2006; Khan et al., 2006; Vasconcelos et al., 2007; Kurtulus et al., 2012; Wang y Li, 2015; Abdelhedi et al., 2020; Candelaria et al., 2020; Godinho et al., 2020; Weidinger, et. al., 2020; Bolborea et al., 2021; Pellegrino et al., 2021). El objetivo de estos estudios es obtener las propiedades de los materiales a partir de correlaciones entre los métodos directos (destructivos) y variaciones en las condiciones del material obtenidas con el método ultrasónico (como por ejemplo: la geometría, contenido de agua inicial, relación de vacíos, edad de curado, edad de ensayo, grado de saturación, diversas relaciones de los componentes (agua/cemento/arena) en

concretos; así como la densidad; composición química, porosidad, temperatura, tamaño y forma de grano, planos de estratificación, anisotropía, presión de confinamiento, textura, estructura, distribución de poros, zonas de alteración y meteorización, propiedades de las juntas y grado de saturación en muestras de roca). Aunado a ello, se tienen también estudios en donde es posible determinar las propiedades dinámicas de los materiales (módulo dinámico equivalente de Young (E), módulo dinámico al esfuerzo cortante (G), razón de amortiguamiento (ζ)) (Yasar y Erdogan, 2004; Slavova et al., 2010; Arma et al., 2017). Todas estas investigaciones han ofrecido nuevas perspectivas para obtener una mejor comprensión de cómo responde el material con el método ultrasónico.

Actualmente hay muy pocos estudios que se centren en estudiar las propiedades del suelo utilizando métodos no destructivos, ya que dichos estudios necesitan el uso de equipos especializados que se han desarrollado o modificado para realizar pruebas en muestras de suelo. Además, se ha observado que los cambios en los suelos afectan la forma en que viajan las ondas de sonido, tal como lo hacen en los estudios con muestras de rocas y concreto. En el caso de los suelos el factor que causa el mayor cambio en la velocidad de la onda de sonido es el contenido de humedad y, aunque en menor proporción, el peso volumétrico seco, las dimensiones de las muestras y la temperatura, pero los estudios han demostrado que el método se puede usar para definir las propiedades dinámicas, al igual que se puede usar para definir las propiedades físicas de los suelos de forma rápida y confiable, lo cual ayuda a una descripción preliminar muy completa del material (Leong et al., 2004; Slavova et al., 2010; Wang et al., 2014; Wang y Li, 2015; Payon et al., 2017; Canivell et al., 2018; Weidinger et al., 2019).

Los resultados positivos y la falta de investigación en tecnología ultrasónica en nuestro país, han motivado a realizar este trabajo, el cual se centra en diseñar y realizar pruebas controladas de laboratorio que se enfocan en producir, propagar y analizar ondas elásticas en diversos materiales de prueba (limo, arena y grava), con

el fin de obtener patrones de comportamiento (correlaciones) de dichas ondas en las muestras de suelo y lograr una base sólida para su implementación en campo.

Un objetivo de este estudio es definir los pesos volumétricos a partir de la velocidad de ondas con ecuaciones empíricas resultado de correlaciones entre estos valores, aunado a ello se realizó experimentación con diferentes humedades para determinar cuál es el papel que juega esta variable en los resultados obtenidos por la prueba de velocidad de pulso ultrasónico.

1.1. JUSTIFICACIÓN

Los estudios geotécnicos de rocas y suelos sirven para conocer sus propiedades y diseñar cimentaciones para edificios, puentes y centrales eléctricas, por mencionar algunas estructuras, así como la estabilización de taludes y el diseño geotécnico de caminos, túneles y puentes. Como la información geotécnica precede a la construcción de cualquier estructura, esta representa un desafío para los ingenieros geotécnicos para proporcionar resultados de manera oportuna y confiable (Geotest, 2022). Adicionalmente, es común realizar estudios de suelos en áreas remotas y de difícil acceso debido a las pronunciadas pendientes, la presencia de agua, las temperaturas extremas y las grandes altitudes, entre otros factores que terminan complicando los estudios (Camacho et al., 2013). Como resultado, se buscan métodos alternativos para obtener las propiedades físicas y mecánicas del suelo de manera rápida, económica y con resultados confiables.

De acuerdo con la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNT por sus siglas en inglés), los métodos no destructivos (MND) son métodos que no modifican las características físicas o la composición del elemento en estudio, no dañan ni destruyen la muestra o causan cambios imperceptibles. La ventaja de utilizar sondeos no destructivos es que pueden utilizarse con mayor rapidez, lo que siempre es importante en el desarrollo de proyectos de construcción (López, Lara y Trujillo, 2011).

Por los beneficios que brindan, los MND han sido adoptados en México por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC-Metro), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Petróleos Mexicanos (PEMEX), Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (IPN,2018), etc.

Específicamente, la prueba ultrasónica es un método no destructivo utilizado para evaluar las propiedades mecánicas, físicas e imperfecciones de materiales como: metales, concreto, rocas, entre otros, a fin de conocer su condición o calidad. La utilidad del ensayo en estos materiales es el punto de partida de esta investigación para su aplicación en suelos; los hallazgos ayudarán a obtener una comprensión más completa del comportamiento de las ondas sonoras en los suelos al establecer correlaciones entre la velocidad del pulso ultrasónico y las propiedades del material, haciendo una contribución significativa a la literatura sobre el tema y sirviendo como base para futuros estudios geotécnicos utilizando pruebas ultrasónicas.

1.2. DESCRIPCIÓN DE PROBLEMA

Previo a la construcción de un edificio, se debe caracterizar el sitio para maximizar la ingeniería, tanto en términos de costos como de prevención de riesgos relacionados con las características del sitio (Jaimes, 2011).

Para conocer las propiedades y características del suelo es necesario realizar una exploración interna del suelo utilizando algún tipo de metodología de exploración. La información recopilada representa las características y propiedades de un grupo de puntos del suelo. Los valores obtenidos pueden considerarse independientes debido a las variaciones que presenta el estrato, es decir, la relación entre ellos puede ser casual y se puede considerar que no existe posibilidad de dependencia o conexión entre ellos. Por esta razón, a medida que más puntos sean analizados, aumentará la precisión del estudio geotécnico (Delgado, 2009).

Actualmente, las técnicas de exploración más populares se rigen por las normativas de la ASTM (American Society for Testing and Materials), en las cuales se describe el procedimiento que se debe seguir para cada prueba. La mayoría de estos

ensayos destructivos de laboratorio requieren la extracción de muestras inalteradas obtenidas en una exploración superficial del tipo PCA (Pozo a Cielo Abierto) o muestras alteradas de sondeos profundos del tipo mixto (SM) con pruebas de Ensayo de Penetración Estándar (SPT, por sus siglas en inglés) para su análisis.

Aunado a ello, es común encontrar zonas que requieren estudios y que se localizan en lugares críticos por su naturaleza geológica, es decir, se encuentran cerca o en cavernas, aguas subterráneas, con cambios radicales de estratos, fallas. Estas condiciones causan un mayor tiempo en el estudio geotécnico. Además, el tiempo requerido para extraer una muestra de sondeos superficiales o profundos (PCA o SM), analizar los datos en un laboratorio y obtener resultados, puede ser ocasionalmente una limitación para la ejecución de un proyecto, ya que para obtener una descripción completa del sitio se requiere realizar múltiples sondeos.

Proporcionar información rápida, preliminar y de forma práctica es el objetivo principal del método basado en la velocidad de pulso ultrasónico. El desarrollo de la aplicación de esta técnica en la geotecnia permitirá o mejorará la toma de decisiones en campo, por lo tanto, la elección de la ubicación de los sondeos será más efectivo y representativo del área, lo que resultará en una menor inversión de tiempo y costo. De igual manera respaldará los resultados de las pruebas directas en laboratorio.

A partir de cómo se comporta la velocidad de las ondas ultrasónicas cuando se realizan cambios en las muestras de suelo, esta investigación busca establecer relaciones entre las propiedades mecánicas, físicas y gravimétricas de un suelo con la velocidad de las ondas ultrasónicas. Por tal motivo, la experimentación controlada en laboratorio es crucial para esta investigación antes de que se aplique en campo.

2. HIPÓTESIS

La calidad de los suelos (sus propiedades físicas y mecánicas) se determinan al conocer la velocidad de las ondas de pulso ultrasónico, debido a que la velocidad de las ondas sonoras está directamente relacionada con el medio en el que se propagan.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer la relación del comportamiento de la velocidad de la onda sonora con cambios físicos de un suelo.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el impacto de la relación entre el diámetro y la longitud de las probetas en suelos finos sin humedad (mismas condiciones) en las lecturas de la velocidad de pulso ultrasónico.
- Determinar la relación entre la velocidad del pulso ultrasónico con el cambio del peso volumétrico.
- Determinar cuál es la influencia de la humedad en la propagación de la velocidad de las ondas sonora, con cambios en el peso volumétrico de un suelo
- Determinar la relación que existe entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia (obtenida de la prueba de compresión simple).

4. MARCO TEÓRICO

El suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas con organización definida y propiedades vectoriales variables. En términos geotécnicos, un suelo es un material terroso, que va desde un relleno de desperdicio hasta areniscas parcialmente cementadas o latitas blandas. Es fundamental enfatizar que el contenido de agua juega un papel fundamental en el comportamiento mecánico del suelo y, como tal, se considera un componente importante del mismo (Badillo y Rodríguez, 1973).

4.1. PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Los suelos en su estado natural tienen tres elementos (fases), las partículas sólidas, las partículas de agua y las partículas de aire o gas. En la Fig. 4.1 se muestran las relaciones entre el peso y volumen de dichas fases, además, la ecuación 1 permite entender la relación de volumen total en una muestra de suelo.

$$V = V_S + V_V = V_S + V_W + V_a \quad (1)$$

En donde:

V_S =Volumen de sólidos del suelo

V_V =Volumen de vacíos

V_W =Volumen de agua en los vacíos

V_a =Volumen de aire en los vacíos

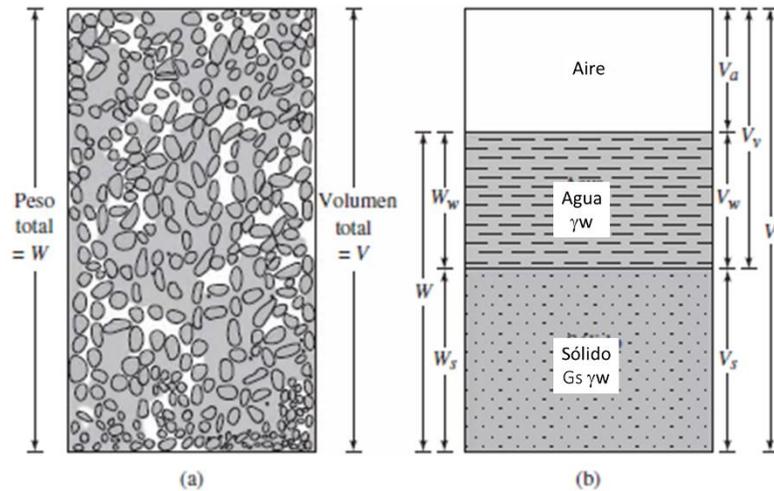


Figura 4.1 (a) Elemento de suelo en estado natural; (b) tres fases del elemento de suelo. Fuente: Das, B. M. (2015).

De la misma manera, la ecuación 2 muestra el peso total de una muestra de suelo considerando que el peso del aire es mínimo.

$$W = W_S + W_w \quad (2)$$

En donde:

W_s = Peso de las partículas sólidas del suelo

W_w = Peso del agua

4.1.1. RELACIONES DE VOLUMEN

De acuerdo a las relaciones entre el volumen de cada fase o elemento del suelo, es posible establecer tres relaciones principales de volumen: relación de vacíos, porosidad y grado de saturación.

La relación de vacíos (e) se define como la relación de volumen que involucra el volumen de las partículas del sólido y el volumen de los vacíos, como se observa en la ecuación 3.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

La porosidad (n) se define como la relación de volumen de vacíos entre el volumen total del suelo. La ecuación 4 muestra esta relación.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (4)$$

El grado de saturación (S) se establece como la relación entre el volumen de agua con respecto al volumen de vacíos; es decir, es el porcentaje de los espacios vacíos totales que están ocupados por agua, tal como se muestra en la ecuación 5. Esta relación normalmente se muestra como un porcentaje.

$$S = \frac{V_w}{V_v}; S(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (5)$$

Para suelos saturados, el grado de saturación es del 100%.

4.1.2. RELACIONES DE PESO

En cuanto al peso de las fases de un suelo, se tienen dos relaciones de peso comúnmente utilizadas: el contenido de humedad y el peso unitario.

La relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos en un volumen dado de suelo se conoce como contenido de humedad (w) o contenido de agua. (ver ecuación 6).

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (6)$$

El peso unitario (γ), es peso por unidad de volumen de suelo húmedo (ver ecuación 7).

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (7)$$

Mientras que para en un suelo seco, se busca el peso unitario seco (γ_d), usando la ecuación 8.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (8)$$

4.1.3. LÍMITES DE ATTERBERG (CONSISTENCIA DEL SUELO)

La plasticidad es una propiedad del suelo que sólo depende de sus elementos finos. Sin embargo, el análisis granulométrico no puede utilizarse para determinar esta característica. Por consiguiente, con el objetivo de obtener esta propiedad, el científico sueco Atterberg desarrolló un método que establece los límites entre los tres estados del suelo (líquido, plástico y sólido) en el que se puede presentar un suelo dependiendo del contenido de humedad (García. 2013; Das, 2015). A continuación, se describe los estados de un suelo.

- Estado líquido: Estado del suelo en donde tiene las propiedades de una suspensión.
- Estado semilíquido: Estado del suelo en donde tiene la propiedad de un fluido viscoso.

- Estado plástico: Estado del suelo en donde tiene la propiedad de ser dúctil, por ello, soporta las deformaciones rápidas sin cambio apreciable de volumen sin agrietarse o astillarse.
- Estado semisólido: Estado del suelo en donde tiene un aspecto firme, sin embargo, al secarse reduce su tamaño.
- Estado sólido: Estado del suelo en donde se tiene un aspecto firme y al secarse no cambia su tamaño.

Estos límites se conocen como límites de Atterberg e incluyen el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el límite retráctil (LR). Para realizar los límites de Atterberg se debe tener únicamente elementos finos que pasen por un tamiz número 40 (#0.42 mm).

Tabla 4.1 Diagrama de consistencia de suelos finos, de Atterberg. Fuente: González Caballero, M. (2004).

Humedad (w), Creciente →				
Estados:	Sólido	Semisólido	Plástico	Semilíquido
Consistencia:	Dura	Semidura	Plástica	Fluida
Límites:		LR	LP	LL

Límite líquido (LL): Es el porcentaje de contenido de humedad en relación con el peso de la muestra de suelo seco, es decir, representa la cantidad de humedad que se requiere para que el suelo cambie de un estado sólido a líquido, de acuerdo con el ensayo de Casagrande, el ensayo consiste en una masa de suelo colocada en la copa de Casagrande que es dividida en dos partes que alcanzan a juntarse tras ser sometida a un número de golpes (Normas ASTM D-4318). El objetivo es encontrar el contenido de humedad con el que estas dos partes se unan con 25 golpes. En general se usan de cuatro a cinco muestras de suelo con diversas humedades y los golpes necesarios para la unión de estas secciones (que varían entre 15 a 35) y por medio de una gráfica (curva de fluidez) se obtiene el contenido de humedad correspondiente a 25 golpes (Fig. 4.2).

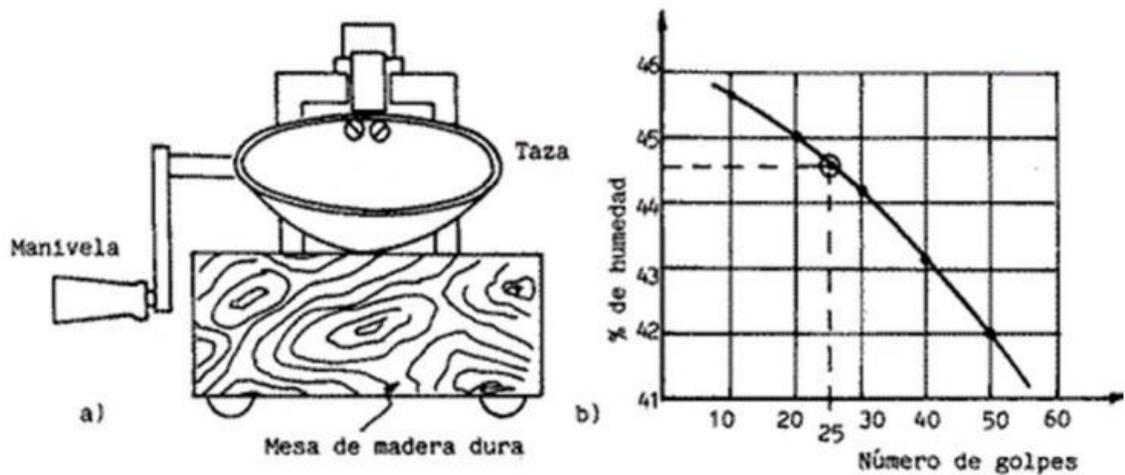


Figura 4.2 Límite Líquido: a) Copa de Casagrande; b) Curva de fluidez. Fuente: Fernández, J. A. G. (2017).

Límite plástico (LP) (o límite inferior de estado plástico). Es el porcentaje de contenido de humedad en relación al peso del suelo seco, con el cual pierde su consistencia plástica. Este límite se determina usando una parte de suelo que pasa por el tamiz número 40 (# 0.42 mm) al cual se le proporciona humedad (inferior a la humedad de límite líquido), creando una masa con el que se hacen filamentos (cilindros) con un diámetro aproximado de 3.2 mm y con un peso de 8.0 gr. Al formar los filamentos sobre una superficie impermeable, la masa de suelo comienza a perder humedad y a desquebrajarse, indicando el cambio del estado del suelo (ver Fig.4.3). Este procedimiento se realiza varias veces hasta tener varios filamentos y el promedio de su contenido de humedad corresponde al límite plástico del suelo.



Figura 4.3 Prueba de límite plástico, formación de filamentos. Fuente: propia y Fernández, J. A. G. (2017).

Límite de retracción (LR). Es el porcentaje de contenido de humedad por debajo del cual una disminución en la humedad no produce un cambio en el volumen.

El Índice Plástico (IP) de un suelo, se calcula con la ecuación 9, que es el valor resultante de la resta de la humedad del límite líquido y la humedad del límite plástico. Este índice muestra en que valores de humedad, el suelo se encuentra en estado plástico.

$$IP = LL - LP \quad (9)$$

En donde:

IP = Índice Plástico (%)

LL = Límite Líquido (%)

LP = Límite Plástico (%)

El Índice Plástico permite conocer el grado de plasticidad de un suelo, como se puede observar en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Plasticidad de un suelo respecto al índice de plasticidad. Fuente: Villalaz, C. C. (2005).

Índice de plasticidad (IP)	Descripción
0	No plástico
1-5	Ligeramente plástico
5-10	Baja plasticidad
10-20	Mediana plasticidad
20-40	Alta plasticidad
>40	Muy alta plasticidad

4.1.4. CARTA DE PLASTICIDAD

El científico Casagrande determinó los límites líquido y plástico de una gran cantidad de suelos en 1932. Con base en la información que obtuvo, propuso una carta de plasticidad (ver Fig. 4.4) (Grønbech et al., 2011). Este gráfico se divide principalmente a lo largo de una línea empírica denominada A, que separa principalmente a las arcillas no orgánicas de limo no orgánicos; por otro lado, la línea U es el límite que existe entre la relación del índice de plasticidad y el límite

líquido para cualquier suelo encontrado hasta este momento. La información presentada en el gráfico es de suma importancia ya que sirve de base para la clasificación de suelos finos de acuerdo al S.U.C.S (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

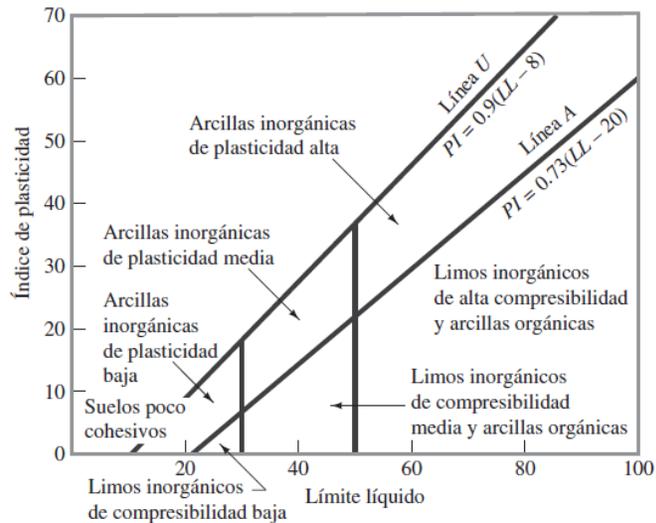


Figura 4.4 Carta de plasticidad. Fuente: Das, B. M. (2015).

4.1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

En el mundo existen una gran cantidad de suelos con diferentes propiedades, comportamientos y características. Desde que se comenzó a estudiar a los suelos con diversos fines, se comenzaron a desarrollar métodos de clasificación que cubrían la necesidad y el uso para un campo de aplicación específico, desarrollados por ingenieros desde diferentes perspectivas. Algunos ejemplos de los métodos de clasificación son: la clasificación de acuerdo al tamaño de las partículas de suelos, la clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (AASHTO), la clasificación de la Administración de Aeronáutica Civil (C.A.A), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S), etc. Sin embargo, se ha tratado de unificar la clasificación teniendo en cuenta que es importante basarse en las propiedades mecánicas de los suelos, porque son vitales en las muchas aplicaciones de ingeniería. Actualmente, ha existido una gran aceptación el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) ya que es el que mejor se adapta a

los múltiples campos en los que se aplica la geotecnia, generando un lenguaje universal y una caracterización general de los suelos.

Clasificación por el tamaño de las partículas.

Esta clasificación fue desarrollada por la Comisión del Río de Mississippi. Con la información obtenida de la granulometría, es decir, con el porcentaje de arena, limo y arcilla del suelo, se trazan tres líneas en el triángulo (ver Fig. 4.5) y de esta manera determinar qué tipo de suelo se tiene: una arena, arena limosa, arena arcillosa, etc., es la clasificación más simple, pero es indirecta porque sólo toma en cuenta una de las características del suelo: el tamaño de las partículas (Crespo, 2004).

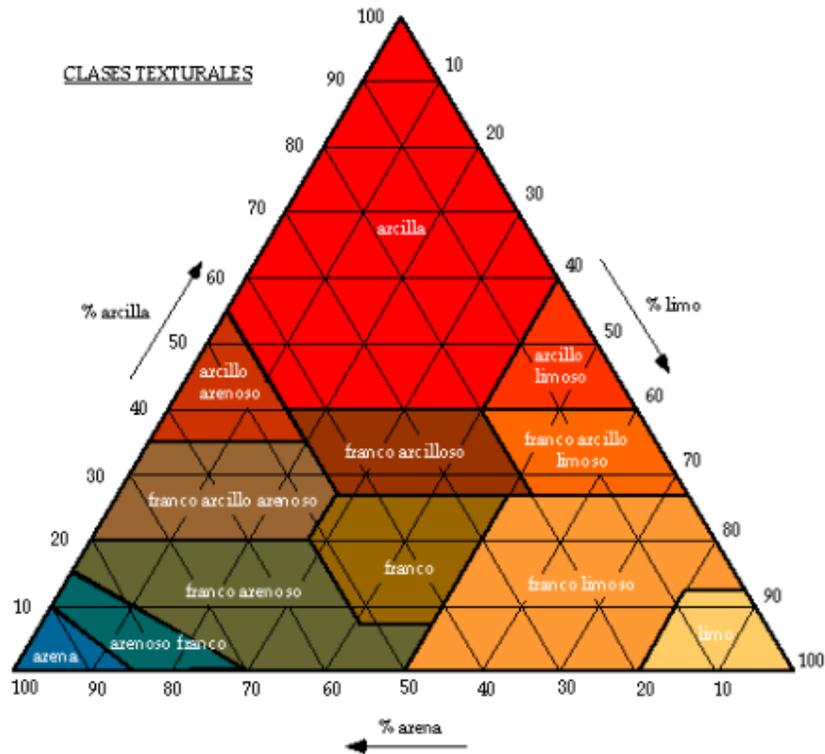


Figura 4.5 Clasificación por el tamaño de las partículas del suelo de acuerdo a la Comisión del Río Mississippi.

Sistema de clasificación AASHTO

Esta clasificación se comenzó a desarrollar en 1929, pero desde su creación ha tenido varios cambios. La versión que actualmente se tiene es de 1945, en donde el sistema tiene siete grupos denominados del A-1 al A-7 (Das, 2001). La siguiente descripción se utiliza para determinar qué tipo de suelo se tiene. En donde se puede observar dos grupos bien definidos: gruesos granulares y suelos finos granulares, los cuales se describen de forma concreta a continuación.

Los suelos clasificados como gruesos granulares son aquellos que >35% pasa la malla #200 (# 0.074 mm), estos suelos a su vez se clasifican en tres tipos:

A-1= Menos del 20% de las partículas de estos suelos pasa la malla #200 (# 0.074 mm), menos de 50% pasa la malla #40 y su índice de plasticidad es menor al 6%.

A-2=Menos del 35% de las partículas pasa por la malla #200 (# 0.074 mm), (limoso o arcilloso) y este material no entra en la clasificación A-1 y A-3.

A-3= Menos del 35% de las partículas de estos suelos pasa la malla #200 (# 0.074 mm) y al menos el 51% o más pasa la malla #40 y su plasticidad es baja.

Los suelos clasificados como fino granulares (limo-arcillas) = Más del 35% de las partículas pasan la malla #200 (# 0.074 mm), estos suelos se clasifican en cuatro tipos de acuerdo a su límite líquido y su índice plástico:

A-4= Su índice plástico ≤ 10 (limo) y su límite plástico $\leq 40\%$

A-5= Su índice plástico ≤ 10 (limo) y su límite plástico $\geq 41\%$

A-6= Su índice plástico ≥ 11 (arcilla) y su límite plástico $\leq 40\%$

A-7= Su índice plástico ≥ 11 (arcilla) y su límite plástico $\geq 41\%$

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos fue presentado inicialmente por el científico Casagrande en 1942. Esta clasificación se realiza de acuerdo a las propiedades granulométricas y plásticas de los suelos finos (Das, 2001).

La clasificación según la S.U.C.S son de la siguiente forma:

Suelos de grano grueso: cuando menos del 50% de las partículas del suelo seco pasa por el tamiz 200 (# 0.074 mm), los prefijos para esta clasificación son G (gravas) o S (arenas).

Suelo de grano fino: cuando más del 50% del peso del suelo seco pasa por el tamiz 200 (# 0.074 mm), los prefijos para esta clasificación son M(limo) y C(arcillas).

Suelos orgánicos: son suelos que se identifican por su color, su olor y de forma esponjosa. Con tendencia a ser altamente compresible, su prefijo es O (arcillas o limos orgánicos).

Para cada tipo de suelo el Sistema Unificado establece símbolos para identificarlos comenzando con los prefijos mencionados en los párrafos anteriores acompañados por W (bien graduado), P (mal graduado), L (baja plasticidad), H (alta plasticidad).

En la tabla 4.3 se muestra la comparación entre la clasificación de suelos hecha por AASHTO, S.U.C.S y la FAA

Tabla 4.3 Clasificación de suelos de acuerdo a AASHTO, SUCS y FAA. Fuente: Villalaz, C. C. (2005).

AASHTO	S.U.C.S	FAA
A-1a	GW, GP, SW, GM	E-1
A-1b	SW, SP, SM, GC	E-1
A-3	SP	E-1, E-2
A-2-4	CL, ML	E-1, E-2, E-4
A-2-5	CL, ML, CH, MH	
A-2-6	CL, ML	
A-2-7	CL, ML, CH, MH	
A-4	CL, ML	E-5, E-6
A-5	CL, ML, CH, MH	E-9
A-6	CL, ML	E-5, E-7, E-8, E-10, E-11, E-12
A-7	CL, ML, CH, MH	E-7, E-8, E-9, E-10, E-11, E-12
A-8	TURBA Y DETRITO ORGÁNICOS	E-13

4.1.6. COMPACTACIÓN

La compactación es un proceso mecánico con el que se pretende hacer un reajuste o acomodo de las partículas del suelo. El objetivo es que el suelo mejore sus propiedades, que tenga una mayor densidad, reduzca su permeabilidad para tener una menor deformación al aplicar una carga (contrarrestar la compresibilidad), así como incrementar su capacidad portante.

Después de investigaciones realizadas por R.R. Proctor encontró que existe una humedad con cierta energía de compactación con la cual se tiene el peso volumétrico máximo del suelo (Crespo, 2004). Estos valores se obtienen cuando se realiza la compactación del suelo con diversos contenidos de humedad y en consecuencia con diversos pesos volumétricos, y con ello se busca la densidad seca máxima o peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y la humedad óptima (W_{opt}). La densidad seca máxima es el punto más alto de un suelo compactado con una cantidad específica de energía de compactación y contenido de humedad. Por otra parte, la humedad óptima es aquella que, por compactación, da como resultado la densidad seca máxima del suelo.

En general, la prueba consiste en compactar tres capas de suelo humedecido en un cilindro. La compactación se hace con un pistón de 2.5 kg con 25 golpes, cayendo el peso desde una altura de 30 cm en cada golpe. Con el paso de los años, varias organizaciones realizaron cambios a esta prueba y, como resultado, los suelos tienen diferentes densidades máximas secas y humedades óptimas cuando se aplica una energía por unidad de volumen variable.

Se ha demostrado que, al aumentar la energía aplicada, el suelo aumenta su densidad seca máxima y disminuye su humedad óptima. Como resultado, es fundamental tener en cuenta el procedimiento utilizado para realizar la prueba de compactación.

Por lo tanto, la prueba de Proctor tiene como fin encontrar el peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado usando un procedimiento definido para muestras de suelo con varios contenidos de humedad.

En esta prueba se puede observar que, si la humedad de un suelo aumenta, se aplica un medio lubricante entre sus partículas, lo que permite cierto acomodo de éstas cuando se someten a un esfuerzo de compactación. Esto da como resultado el mejor acomodo de las partículas del suelo y, por ende, se obtiene el mayor peso volumétrico, la humedad se conoce como humedad óptima. En el caso en que se aumente o disminuya la humedad, se debe aumentar el trabajo de las máquinas compactadoras para obtener el mismo resultado.

4.2. PROPIEDADES DE LAS ONDAS MECÁNICAS (ELÁSTICAS)

4.2.1. ONDAS

Las ondas denominadas mecánicas se propagan cuando existe un material elástico, que debido a la cualidad del material permite la propagación de la energía y, por lo tanto, este tipo de ondas también son conocidas como ondas elásticas.

El material elástico está compuesto por partículas que se unen por fuerzas elásticas entre sí. En estado de reposo, las partículas se encuentran en estado de equilibrio. Al producirse una perturbación, la energía es transmitida partícula por partícula y los movimientos generados son organizados alrededor del punto de equilibrio.

Una perturbación en un medio elástico produce diferentes tipos de ondas: ondas primarias, ondas secundarias y ondas superficiales. Se diferencian principalmente, por la dirección de propagación, debido a que son independientes entre sí.

Ondas primarias, compresionales o longitudinales: Las partículas del medio elástico se mueven en la misma dirección en la que la onda se propaga, y, por lo tanto, son capaces de propagarse en medios sólidos, líquidos y gaseosos. Las ondas primarias son denominadas también como compresionales, porque sólo producen deformaciones volumétricas (ver Fig. 4.6).

Existe una compresión del medio cuando la dirección del movimiento de la partícula y la propagación de la onda es la misma, mientras que en la tensión éstas son

opuestas. Las ondas primarias tienen la mayor velocidad con respecto a las demás ondas.

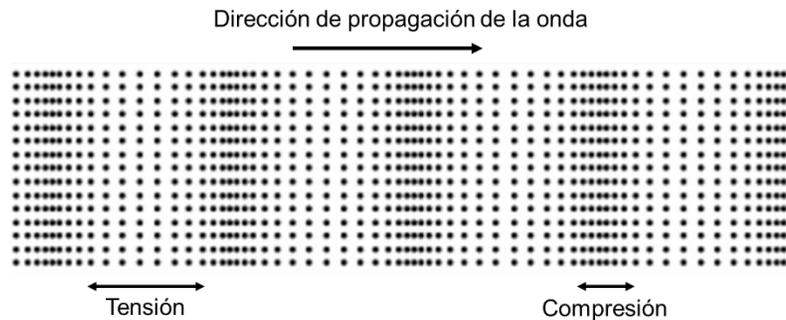


Figura 4.6 Onda primaria, longitudinal o de compresión. Fuente: Krautkrämer, et al., (1990).

Ondas secundarias, transversales o de corte: Las partículas del medio elástico se mueven en dirección perpendicular en la que la onda se propaga; es decir, existe un movimiento cortante; por lo tanto, sólo se propagan en medios sólidos debido a que los líquidos no soportan esfuerzos de corte (ver Fig. 4.7).

Como su nombre lo indica, las ondas secundarias, arriban después de las ondas primarias.



Figura 4.7 Onda secundaria, transversal o de corte. Fuente: Krautkrämer, et al., (1990).

Cuando se tiene un material con bordes, se producen ondas superficiales (ondas Rayleigh y ondas Lamb).

Las ondas Rayleigh se propagan en la frontera de un medio elástico, asumiendo que es plana. Las partículas se mueven en forma vertical y horizontal formando movimientos elípticos, el eje mayor siempre va en dirección a la propagación de la

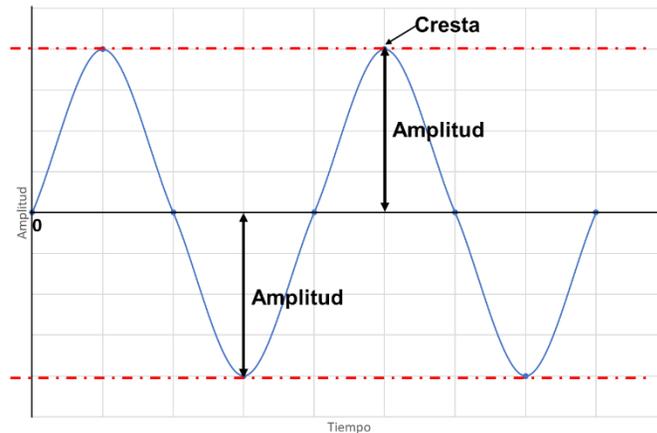


Figura 4.9 Amplitud de una onda. Fuente: modificado de Resnick et al., 2004.

La longitud de onda (λ) es la distancia que le toma a una partícula llegar al mismo punto en el que se encuentra, es decir, la distancia que necesita la partícula para estar en la misma fase, para ello es necesario que recorra un ciclo completo (ver Fig. 4.10).

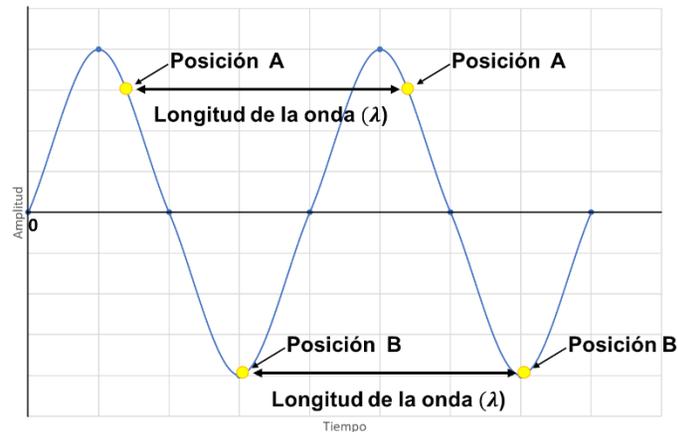


Figura 4.10 Longitud de onda. Fuente: modificado de Resnick et al., 2004.

El periodo de oscilación (T) es un valor en unidad de tiempo que tarda una partícula en estar en el mismo punto, es el tiempo que se tarda para completar un ciclo.

La frecuencia (f) de una onda depende del periodo, debido a que la frecuencia es la cantidad de ciclos completos que una partícula completa en un segundo, su unidad de medida es el Hertz (Hz). Por lo tanto, se puede definir con la ecuación 10.

$$f = \frac{1}{T} \quad (10)$$

La velocidad longitudinal de propagación (V) de una onda se define como la rapidez con la que una partícula del medio elástico transmite la vibración a las partículas consecuentes. Esta velocidad depende directamente de las características del material (densidad y la elasticidad). Si el medio es isótropo y homogéneo, la velocidad longitudinal es constante y se expresa con la ecuación 11.

$$V = \frac{\lambda}{T} = f\lambda \quad (11)$$

En donde:

V = Velocidad longitudinal de propagación

λ = Longitud de onda

T = Periodo

f = Frecuencia

La relación que existe entre la frecuencia, la velocidad de propagación y la longitud de onda, indica que tanto la longitud de onda como la frecuencia de la onda son proporcionales a la velocidad de propagación. Así como se puede observar que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda, es decir, mientras mayor es la frecuencia menor es la longitud de la onda y viceversa.

La atenuación de la vibración de la onda es una característica que se presenta cuando existen cambios en la composición del material o cuando la longitud aumenta, dado que es la disminución de energía mecánica de la onda al pasar por el material.

4.3. ONDAS SONORAS

Las ondas sonoras son un tipo de ondas mecánicas que pueden propagarse en materiales en estado sólido, líquido y gaseoso. Estas ondas se producen cuando un elemento generador (fuente sonora) genera una vibración mecánica que viaja por el medio elástico, con cierta densidad, que permite la creación de una sensación auditiva.

Las ondas sonoras se clasifican en tres grupos que se definen por una banda de frecuencia, que se refiere a intervalos de frecuencia. La banda de frecuencia audible para el caso de los seres humanos es de 20 Hz a 20,000 Hz, para las frecuencias menores a 20 Hz se denominan subsónicos, mientras que para las ondas sonoras con una frecuencia mayor a 20,000 Hz se conocen como ultrasónicas (ver Fig. 4.11).

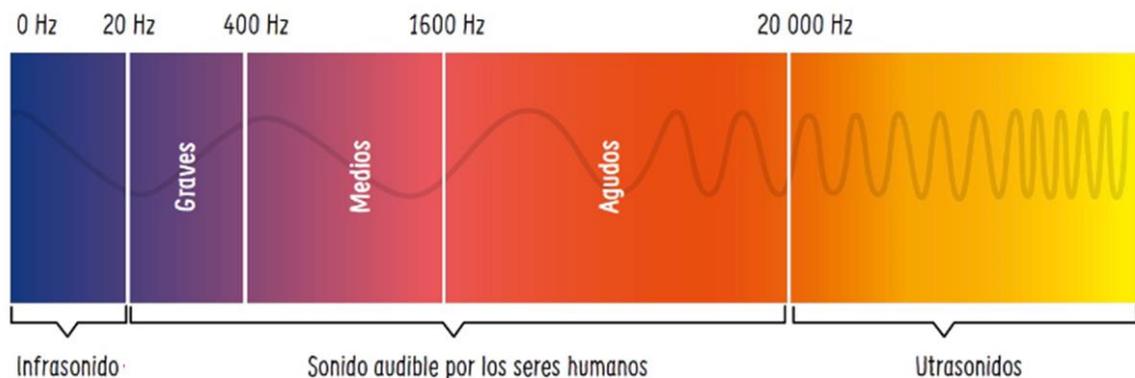


Figura 4.11 Tipo de ondas sonoras de acuerdo a su frecuencia.

La velocidad del sonido depende de las propiedades físicas del material por el que se propaga. Esto se debe a que la velocidad depende de la fuerza que existe entre las partículas del medio. Dichas fuerzas, a nivel macroscópico, se caracterizan por el módulo de Young (E) del medio.

El módulo Young (E) indica que tan difícil es comprimir el medio y se relaciona directamente con la presión sobre el medio. Esto se observa cuando se aumenta la presión sobre un medio su volumen disminuye y su densidad (cociente entre la masa y el volumen) aumenta. Por lo tanto, mientras más pequeño sea el módulo de Young (E) el material es más fácil de comprimir y viceversa. Por ello, el coeficiente

de Poisson (τ) también es un factor a considerar, debido a que se define como la razón entre el alargamiento longitudinal al realizar una presión en el medio, dividido por el acortamiento que se genera en dirección perpendicular a la presión.

En la ecuación 12 se observa que la velocidad de propagación de la onda primaria del sonido depende tres factores: el módulo de la elasticidad o módulo de Young (E), la densidad (ρ) del medio y el coeficiente de Poisson (τ).

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \tau}{(1 + \tau)(1 - 2\tau)}} \quad (12)$$

En el caso de los medios sólidos, es posible la propagación de las ondas primarias y secundarias. La velocidad de la onda secundaria del sonido está determinada por el módulo de rigidez o cortante (G) que tiene valores menores que el módulo de Young, la densidad (ρ) del medio y el coeficiente de Poisson (τ) (ecuación 13).

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \tau)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (13)$$

En las ecuaciones de velocidad de las ondas primarias y secundarias en materiales homogéneos, se observa que la frecuencia es un factor que interviene y como consecuencia no se presenta el fenómeno de dispersión.

4.4. PRUEBA NO DESTRUCTIVA: VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO

4.4.1. ANTECEDENTES

Las propiedades de las ondas acústicas hicieron que el sonido se utilizará en diferentes áreas de la investigación, permitiendo conocer el medio en el que se propagan. El principal beneficio de hacer pruebas ultrasónicas es que no alteran las propiedades físicas, químicas, o mecánicas de los materiales en los que se realizan.

Es por ello que es una prueba conocida como un ensayo no destructivo, denominados así por la ASNT (American Society of Nondestructive Testing, por sus siglas en inglés).

Desde 1920 se han desarrollado estudios no destructivos basados en ondas ultrasónicas. Sin embargo, no fue hasta 1940 en los Estados Unidos de Norte América, que el Dr. Floyd Firestone introdujo el reflectoscopio, un dispositivo que podía generar pulsos ultrasónicos para determinar la profundidad y el tamaño relativo de las fracturas en piezas de varios tamaños (Camacho, 2018). Posteriormente, con el desarrollo del sonar durante la segunda guerra mundial fue posible gracias a la investigación de las ondas ultrasónicas, que resultó en un avance importante en este campo. Por su parte, en la misma década, Leslie y Cheesmas realizaron pruebas en Canadá hasta lograr identificar las condiciones del concreto en las cortinas de una presa. De igual manera, los doctores Jones y Gatfield aplicaron la técnica para determinar las condiciones del concreto en Inglaterra (Vidaud y Vidaud, 2016).

Con los avances que se lograron, una de las pruebas ultrasónicas conocida como la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) comenzó a mostrarse significativamente prometedora como método alternativo no destructivo (indirecto). Desde la década de 1940, se han realizado estudios en la industria de la construcción para evaluar la calidad del concreto utilizando correlaciones que indican indirectamente las características físicas y mecánicas del material en función de la velocidad ultrasónica.

Actualmente, esta prueba se utiliza para inspeccionar materiales; es decir, para identificar discontinuidades, fallas tanto internas (tamaño de los elementos, estructura y constantes estáticas), como externas (corrosión, espesor, etc.), así como como el grado de degradación, durabilidad y resistencia del material.

Por consiguiente, comenzó el interés por utilizar el método de VPU aplicado a los concretos para evaluar la calidad, es decir, conocer la resistencia, las grietas, la microestructura o los defectos que presenta el material en laboratorio o en el sitio,

a través de una asociación entre la velocidad de la ondas y las propiedades del material en estudio que generalmente se obtiene de pruebas destructivas (por ejemplo: la prueba de compresión uniaxial (Sena et al., 2003; Akkaya et al. 2003; Khan et al., 2006; Zhang et al. 2010; Su et al. 2012; Ercikdi et al. 2014; Godinho et al., 2020; Candelaría et al., 2020; Da Silva et al., 2020; Hong et al., 2020; Cárdenas et al., 2020; Pellegrino et al., 2021; Bolbera et al., 2021).

De igual manera, el método de VPU ha sido investigado y utilizado para rocas, siendo el objetivo caracterizar y/o determinar las propiedades cualitativas propiedades cuantitativas. La versatilidad del método permite su uso in situ o en laboratorio con condiciones controladas (Kahraman, 2001, 2001; Song, et al.,2004; Yasar y Erdogan, 2004; Marinos et al., 2006; Vasconcelos et al., 2007; Moradian y Behnia, 2009; Kurtulus et al., 2012, 2016; Hamd y Lafhaj, 2013; Gallot et al., 2015; Abdelhedi et al., 2017, 2020; Chawre, 2018; Gomez-Heras et al., 2020; Arman y Paramban, 2020; Garia et al., 2021; Singh et al., 2022).

Los autores afirman que existen una serie de variables que tienen una relación directa con la propagación de las ondas ultrasónicas, incluido el tipo de roca (volcánica, metamórfica o sedimentaria), su composición química, el tamaño de los granos que la componen, su forma y distribución, el grado de fracturamiento, alteración y meteorización, así como su porosidad, tamaño y temperatura.

El estudio de Kilic de 2006 demuestra cómo los cambios en la estructura cristalina y las impurezas que tiene cada núcleo de roca tienen un impacto en la velocidad de las ondas sonoras. Por otro lado, Eberli et al. (2003) realizan experimentos en rocas carbonatadas y llegan a la conclusión de que la velocidad ultrasónica depende de la porosidad de la roca; es decir, a medida que aumenta la porosidad de la roca, disminuye la velocidad, lo que se atribuye a la posibilidad de que el vacío actúe como barrera a la propagación de la onda ultrasónica; resultados que concuerdan con la correlación lineal de Kurtulus et al. (2012) en núcleos de roca serpentinita.

Como consecuencia, si hay menos vacíos dentro de una muestra de roca, ésta tendrá una mayor densidad y por lo tanto se tiene una mayor velocidad. Este

comportamiento fue examinado en rocas de caliza por Yasar y Erdogan en 2004, demostrando que los núcleos de mayor densidad reportaron velocidades más altas. En tanto, Vasconcelos et al., (2008) y Chen et al., (2015) establecen de igual manera, correlaciones lineales entre la porosidad y la velocidad de la onda sonora para rocas de serpentinita y basalto, respectivamente.

Además de conocer las características físicas del material, el método VPU se ha utilizado para comprender las características dinámicas y mecánicas de las rocas al relacionar las velocidades ultrasónicas con datos obtenidos de pruebas destructivas como la resistencia a la compresión uniaxial (Hamdi y Lafhaj, 2013; Vasconcelos et al., 2007). Los resultados fiables que se han conseguido han impulsado la mejora de esta técnica. Una contribución significativa es el análisis de la influencia de la geometría y frecuencia de los transductores más adecuados para obtener resultados representativos.

Los estudios mencionados anteriormente, se realizaron en laboratorio en condiciones controladas; sin embargo, una de las grandes ventajas es su aplicación en el sitio, como lo desarrolló Binda et al., 1998, donde usaron el método para identificar secciones antiguas en muros de mampostería en edificaciones.

Como se mencionó anteriormente, el método no destructivo basado en la VPU, sirve para conocer los materiales. A lo largo del tiempo, se han realizado intentos por establecer correlaciones entre la velocidad de las ondas acústicas con las propiedades elásticas dinámicas, las propiedades elásticas estáticas, densidad seca, el contenido de humedad y por ende el grado de saturación, relación de vacíos, así como los límites de Atterberg de los suelos. (e.g., Aracne-Ruddle et al. 1999; Yesiller et al. 2001; Wang et al. 2002, Inci, Yesiller y Kagawa 2003; Leong, Yeo y Rahardjo, 2014; Fener et al. 2005; Weidinger y Ge 2009), con la finalidad de integrar este método y obtener resultados de forma rápida para describir el suelo. Fue en 1950, cuando el investigador Leslie comenzó a determinar que la velocidad máxima de una arena limosa ocurre cuando el suelo tiene tanto la humedad máxima como el contenido óptimo de humedad (Vidaud y Vidaud, 2016). Por su parte,

Hardin y Richard, en 1963, realizaron experimentos en arenas secas, parcialmente saturadas y saturadas para conocer cómo afecta el contenido de agua en la velocidad de la onda sonora (Hardin y Richard, 1963). Para 1984, Alba et al., establecieron una relación directa entre la resistencia a la licuefacción de suelos arenosos y la velocidad de la onda secundaria, de esta manera, pudieron reconstruir muestras con la resistencia a la licuefacción que tiene la arena in situ. Debido a que los experimentos se realizaban en laboratorio, en 1991, Want et al., realizaron una investigación que consistió en conocer la variación que provoca la presión de la compactación estático y el contenido de agua en la velocidad del pulso ultrasónico en las muestras de suelo. Sheng et al., 2001 y Christ y Park, 2009, realizaron estudios en suelos congelados (arena, arena limosa y limo) para conocer a partir de la VPU las propiedades mecánicas dinámicas (resistencia a la compresión) de suelos congelados a diversas temperaturas. Por su parte, Zheng et al., 2002, hicieron análisis de regresión con los datos y obtuvieron una ecuación que permite conocer el módulo de corte máximo de una arena seca conociendo la velocidad de la onda secundaria.

Aunado a ello, por su potencial de aplicación en diferentes tipos de suelo, el método de VPU ha sido desarrollado en estudios muy especializados en sedimentos marinos, midiendo la atenuación en suelos saturados no consolidados con respecto a la velocidad acústica (Moran et al., 2007).

Los estudios más comunes en el campo de la geotecnia son para encontrar la relación entre los módulos de elasticidad dinámicos y los módulos de corte (comportamiento dinámico del suelo) con la velocidad de las ondas primarias y secundarias de la onda sonora (Peng y Masami, 2001; Zheng, Zhang y Wang, 2002; Akkaya et al. 2003; Wang et al., 2006; Claria y Rinaldi, 2007; Moran et al., 2007; Claria y Rinaldi, 2007; Christ y Park, 2009; Zhang et al. 2010; Su et al. 2012; Ercikdi et al. 2014; Wang et al. 2018)

4.4.2. MÉTODOS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ONDAS ULTRASÓNICAS

Existen diferentes métodos para la realización de ensayos no destructivos por ultrasonido al igual que diferentes técnicas para el acoplamiento del transductor en la prueba, entre ellos se tienen los siguientes:

- Ensayo ultrasónico por pulso-eco: El método ultrasónico más común se denomina pulso-eco, el cual consisten en un tren de pulsos ultrasónicos con una alta frecuencia en el rango de 60 pulso hasta 2000 pulsos por cada segundo.

Los pulsos son enviados en la materia por medio de un transductor (también conocido como palpador) piezoeléctrico que se reflejan en el borde del material o en la superficie de cualquier defecto o discontinuidad y las ondas que se reflejan son recibidas de nuevo por el transductor. Uno de los principales objetivos es medir el tiempo que tarda la onda en este viaje. Generalmente después de que el transductor recibe las señales, estos registros son enviados a una pantalla osciloscópica para su visualización. Si el material es completamente homogéneo, la pantalla presentará dos registros, la onda emitida y la onda reflejada que se genera por el borde de la materia.

- Ensayo ultrasónico por transmisión: En este ensayo es necesario dos transductores, que se colocan en superficies paralelas de la materia a inspeccionar, así como una señal ultrasónica. La función de uno de los transductores es enviar la onda y el otro es recibir la onda, con la finalidad de registrar la reducción o la desaparición de las ondas provocada por la presencia de heterogeneidades de la materia; es decir, cuando existen discontinuidades, fisuras o cambios en la composición del material, se produce una disminución y/o alteración de la amplitud y velocidad de la onda. Existen tres formas distintas de aplicar este método: transmisión directa, reflexión y conducción. Los principios de los tres métodos son ellos mismos,

con la diferencia de la posición de los transductores en la superficie de la materia. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de estos métodos.

Método de transmisión directa: Los dos transductores (emisor y receptor) se ubican en dos superficies paralelas de la materia, uno frente al otro (ver Fig. 4.12). El método consiste en enviar una onda sonora que viajará a lo largo del material y será recibida por el transductor receptor. Si en el viaje la onda pasa por un cambio en la materia (un defecto, discontinuidad o heterogeneidad) la onda se reflejará parcialmente, lo que causa una reducción en la amplitud de la onda y, por lo tanto, el transductor receptor recibirá una señal reducida en comparación con las señales en el caso donde el material es homogéneo.

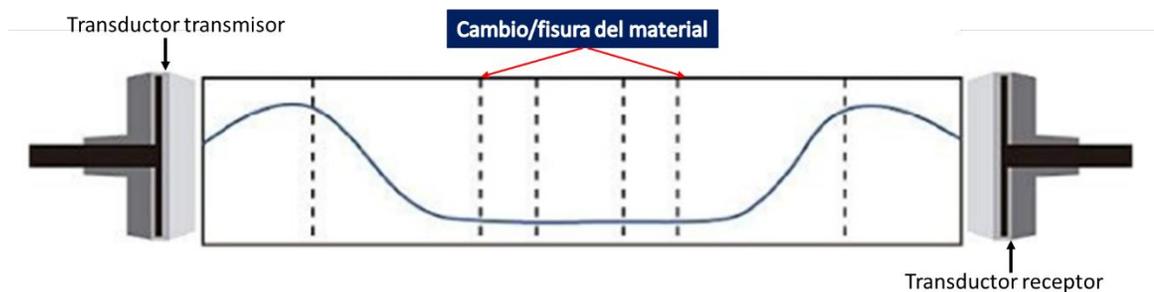


Figura 4.12 Método ultrasónico de transmisión directa. Fuente: Guerra, J. L. (2018).

Método de transmisión con reflexión: Para este método se utilizan dos transductores colocados en la misma superficie del material a inspeccionar, es un método utilizado en condiciones en donde no es posible colocar los transductores en superficies paralelas opuestas.

La disminución de la amplitud de las ondas que registra el transductor receptor, se debe a la existencia de una discontinuidad en el viaje de la onda a través del medio. En contraste con el método pulso-eco, es que mientras el pulso-eco proporciona información sobre las características de la onda reflejada el método

de transmisión con reflexión mide la disminución de la amplitud de la onda por el borde del material.

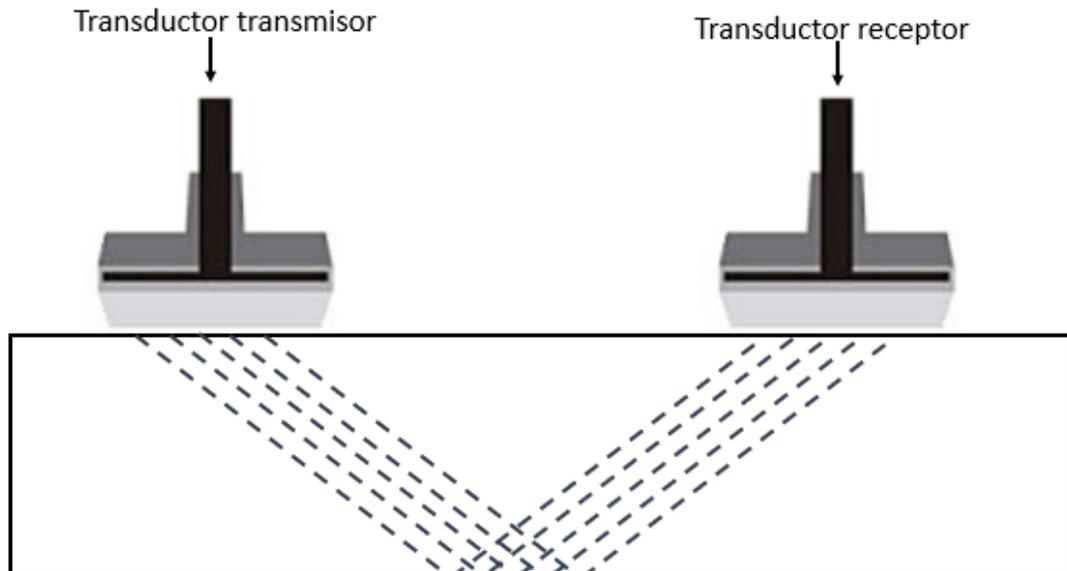


Figura 4.13 Método ultrasónico con reflexión. Fuente: Guerra, J. L. (2018).

Método de transmisión por conducción: Es un método utilizado en materiales con una geometría que imposibilita el uso de los métodos anteriores. El recorrido de las ondas sonoras serán diagonales, es decir, los transductores se ubicarán de forma adyacente, en donde se medirá la distancia teniendo en cuenta la distancia en diagonal a partir del teorema de Pitágoras entre los centros de los transductores.

- **Ensayo ultrasónico por resonancia:** El ensayo de resonancia sirve para determinar espesores del material en inspección, a diferencia de los demás métodos, este ensayo no es adecuado para detectar defectos (como picaduras, cavidades, corrosión, etc.) al menos que la superficie se desgaste de forma uniforme.

La base de este ensayo es medir la frecuencia de ondas estacionarias generadas por la resonancia por reflexión, es decir, se produce una onda con una excitación continua con amplio espectro de frecuencias. Las oscilaciones que tengan una semilongitud de la onda submúltiplo de espesor de la

muestra, se supondrán en la fase e incrementarán y disminuirán las demás, de esta manera se produce el fenómeno de resonancia y con ello la formación de las ondas estacionarias.

Entonces la oscilación primaria o fundamental es la primera semilongitud de onda por espesor, así la oscilación de orden n corresponde a la semilongitud n de onda.

4.4.3. TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO

Las técnicas de ensayo hacen referencia a la forma de acoplamiento de los transductores a la superficie del material que se analizará.

Es importante mencionar que el aire no es un medio para la buena propagación de las ondas sonoras, debido a que la impedancia del aire y de la mayoría de los materiales es muy diferente, convirtiéndose en una barrera entre el transductor y el medio de propagación. En consecuencia, si en el contacto entre el transductor y el material existe aire la transmisión de la onda sonora se verá afectada, de tal modo que se debe asegurar que exista un acople que reduzca o anule la existencia del aire, dicho material se le conoce como acoplante.

En general, existen dos técnicas para la transmisión eficaz de las ondas.

- Técnica de inmersión
- Técnica de contacto

Técnica por inmersión

Es una técnica que comúnmente es utilizada para la inspección automática de materiales que tiene las mismas características (composición y geometría) o en casos donde no sea posible el uso de la técnica por contacto.

El principio de la técnica es tener al agua como acoplante. El agua debe contener agentes antioxidantes, agentes anticorrosión y debe someterse a un proceso de vacío, porque no debe contener burbujas durante la prueba. Si se cumplen todas

las condiciones anteriores, el agua garantiza adecuado contacto entre el transductor y el material.

El proceso de inmersión consiste en sumergir al transductor y el material en el acoplante (agua) por completo, permitiendo explorar el material de manera automática. Algunos equipos permiten el movimiento tanto del transductor como al material (que gira sobre su propio eje) y otros restringen el movimiento solamente al transductor.

Existen dos tipos de ensayo por inmersión, al igual que los ensayos por contacto:

Ensayo con haz normal: que se refiere a que el transductor genera una onda ultrasónica perpendicular a la superficie del material (se tiene un ángulo de incidencia igual a cero).

Ensayo de haz angular: donde la onda ultrasónica se crea con un ángulo; es decir, no es perpendicular a la superficie del material (se tiene un ángulo de incidencia diferente a cero).

Técnica de contacto

Es la técnica manual que se utiliza con mayor frecuencia porque, como su nombre lo indica, el transductor está en contacto directo con la superficie del material que se examina. Simplemente deslizar el transductor (normal o angular) por toda la superficie es todo lo que se requiere para realizar un examen completo del material. Los aspectos desfavorables de esta técnica incluyen imperfecciones en la superficie del material, como la rugosidad que impide un sellado completo y resulta en la presencia de aire, lo que reduce la transmisión del pulso de onda.

Para evitar el aire y facilitar la transmisión de las ondas ultrasónicas producidas por el transductor, es necesario utilizar acoplantes. Los acoplantes más comunes incluyen agua, aceites, pastas especiales, gel, glicerina, grasas, etc. A la hora de elegir el acoplante se debe tener en cuenta la superficie del material, su composición y su temperatura, con el fin de evitar una reacción química entre el material y el

acoplante, así como para facilitar su aplicación y retirada después de las pruebas, así como su disponibilidad, consistencia, etc.

El agua es el acoplante más disponible y económico, pero debido a su baja viscosidad o potencial para causar reacciones de corrosión en los materiales, con frecuencia no es factible usarla. Por el contrario, el grado de irregularidad de la superficie del material determina qué aceites, grasas, geles y acetonas, deben utilizarse como acoples. Cuanto más irregular sea la superficie, más se requerirá un acoplante con una viscosidad más alta. Sin embargo, las grasas a medida que aumenta su viscosidad pierden su capacidad de transmitir energía y se convierten en barreras. Por otro lado, el acoplante más sencillo de utilizar es la glicerina, que se utiliza en materiales de composición muy fina, además es el acoplante más fácil de remover, pero su propiedad de viscosidad se ve afectada por la temperatura. Por ello para ensayos en donde se tiene una temperatura mayor a 300°C, el acoplador se fabrica con material plástico duradero, que soporte estas temperaturas.

4.4.4. TRANSDUCTORES O PALPADORES (GENERADORES DEL ULTRASONIDO)

Los transductores también llamados palpadores o cabezotes es la parte del equipo que produce las ondas ultrasónicas. Existen diferentes tipos de transductores, pero el más es el transductor piezoeléctrico, la cual consta principalmente de un cristal piezoeléctrico. El efecto piezoeléctrico consta de la generación de una carga eléctrica el cual excita el cristal piezoeléctrico, que oscila y produce la onda acústica (deformación mecánica), por otra parte, también es posible generar a partir de una onda mecánica una cara eléctrica. Por lo tanto, a partir de ambos fenómenos es posible el uso del método ultrasónico para generar y recibir las ondas mecánicas de alta frecuencia. Estos fenómenos fueron descubiertos por Jacques y Pierre Curie en 1880 y por Lippmann en 1881 respectivamente.

La deformación generada no es proporcional a la fuerza generada por el transductor piezoeléctrico, la deformación siempre es menor, entonces los sensores

piezoeléctricos tienen un mejor desempeño en materiales líquidos y sólidos. Aunado a ello, la frecuencia que produce el cristal depende directamente de su espesor.

Los cristales mayormente utilizados son: el cuarzo (SiO_2), el sulfato de litio (LiSO_4), el titanio de bario (BaTiO_3), metaniobato de plomo (PbNb_2O_6), cerámicos, etc. A continuación, se describe brevemente las características de cada uno:

Cuarzo: Su frecuencia característica para un espesor de un milímetro es de 2,88 MHz. Dentro de sus ventajas es que tiene una estabilidad eléctrica, química y térmica, también es un material resistente al desgaste, con un buen grado de dureza y de difícil envejecimiento. Sin embargo, dentro de sus desventajas se tiene que una alta deficiencia en la generación de la energía acústica, experimenta interferencias en el modo de conversión, incluso en temperaturas mayores a 550°C el cristal pierde sus propiedades piezoeléctricas.

Sulfato de litio: Su frecuencia característica para un espesor de un milímetro es de 2,36 MHz. Una de sus principales ventajas es que cuenta con una amortiguación acústica óptima, por lo que, se puede obtener una mejora en el poder de resolución. En comparación con el cuarzo, es muy difícil tener interferencias en el modo de conversión, pero con una dureza muy pobre y se debe emplear en temperaturas inferiores a 75°C .

Las cerámicas piezoeléctricas son cristales sintéticos, su principal ventaja es la generación de ondas ultrasónicas cuando trabajan con bajos voltajes de excitación. Esto se debe a sus amplios márgenes en su constante dieléctrica, sus coeficientes piezoeléctricos, su temperatura, etc. Estos materiales se pueden usar a temperaturas de hasta 300°C , no son afectados por la humedad, pero tienen una vida útil más corta, son menos duraderos y tendrán interferencia dependiendo del tipo de cerámica utilizada.

Tipo de transductores

Los tres tipos de transductores más comunes son el transductor normal, angular y de doble cristal. Un transductor está conformado principalmente por el cristal piezoeléctrico incorporado en un amortiguador (resina), dentro de una cubierta que puede ser manipulada por el técnico

Como se mencionó anteriormente, cada transductor tiene una frecuencia, mientras se tengan frecuencias altas se obtendrá una mayor sensibilidad, puesto que el diámetro mínimo detectado se encuentra en el rango de la mitad de la longitud de onda, pero hay una disminución de en la penetración y la divergencia. En el caso de diámetros mayores, hay una mayor sensibilidad y penetración mientras se registra una menor divergencia.

- **Transductores normales**

Los transductores normales operan con ondas primarias o longitudinales que se mandan de forma perpendicular con respecto a la superficie de contacto. En general, produce una frecuencia en el rango de 2.0 MHz a 5.0 MHz con diámetros de aproximadamente 2.0 cm. La longitud de la onda primaria es de 1.0 a 3.0 mm particularmente para materiales de acero para detectar defectos de hasta 0.5 mm. En materiales conformados por granos gruesos o en materiales en fundición se usan frecuencias de 0.5 MHz a 1.0 MHz. Si las frecuencias se aumentan, es posible detectar defectos de menor dimensión, pero el transductor pierde fuerza por el espesor del cristal que no es capaz de generar una energía ultrasónica mayor. Este tipo de transductores oscila en las frecuencias que van de 0.5MHz hasta 10.0 MHz con diámetros de 5.0 mm a 45.0 mm.

Los elementos principales de un transductor son: caja, relleno epóxico, material amortiguador, contacto eléctrico, conector coaxial, el cristal piezoeléctrico y un protector (ver Fig. 4.14).

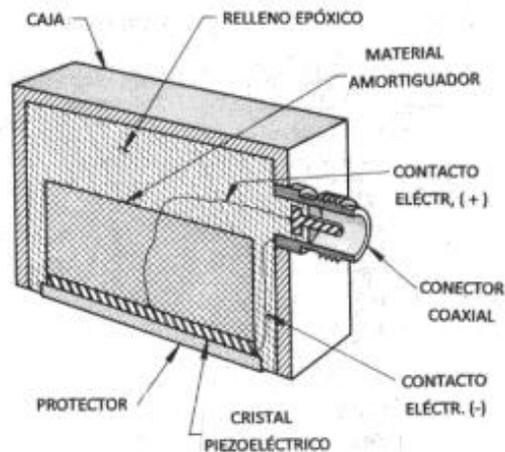


Figura 4.14 Elementos de un transductor normal. Fuente: Mora, A. F. (2010).

- **Transductores angulares**

Los transductores angulares emiten ondas de corte, superficiales y de placa introducidas en el material con un ángulo determinado, es decir, se envía una onda longitudinal de forma oblicua por medio de un acrílico y cuando llega a la superficie sólo penetra la onda transversal con un ángulo conocido (ver Fig. 4.15). Para lograr que este proceso suceda, los transductores angulares deben contar con los componentes de un transductor normal, incorporando un acrílico.

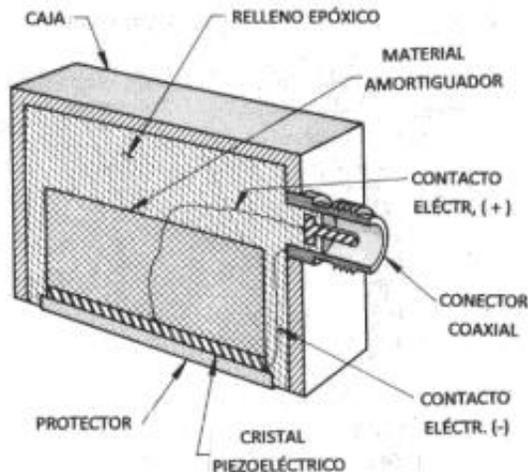


Figura 4.15 Elementos de un transductor angular. Fuente: Mora, A. F. (2010).

- **Transductores de doble cristal**

Los transductores de doble cristal constan de dos cristales, uno que actúa como transmisor y el otro como receptor. Cada uno de ellos tiene sus propios cables y conexiones con la intención de aislarse de uno del otro, con el fin de que el receptor pueda recibir señales de forma continua sin interrupción independientemente de que el emisor envíe o no señales simultáneamente. La colocación de los cristales da como resultado un efecto enfocado que produce un patrón de onda de sonido en forma de V, mejorando la resolución y eliminando la zona muerta casi por completo. En consecuencia, un transductor de doble cristal cuenta con más elementos (ver Fig.4.16) como son: un conector coaxial transmisor, un conector coaxial receptor, un relleno epóxico, contactos eléctricos, material amortiguador, cristales piezoeléctricos, acrílico y barrera acústica.

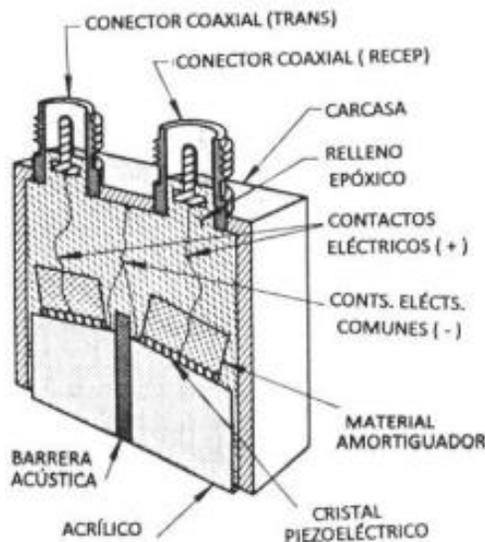


Figura 4.16 Elementos de un transductor de doble cristal. Fuente: Mora, A. F. (2010).

5. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología que se siguió para cada prueba con el propósito de caracterizar los suelos bajo análisis. Las pruebas de laboratorio que se efectuaron son:

- Contenidos de agua
- Tamaños de partículas (granulometría)
- Límites de consistencia para su clasificación de acuerdo al S.U.C.S.
- Límite líquido.
- Límite plástico
- Índice plástico
- Densidad de solidos

Así como la realización de la prueba de compactación dinámica en laboratorio conocida como prueba de compactación Proctor Modificada.

Aunado a ello se hace una descripción detallada de los equipos utilizados en la prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico y de la prueba de Compresión simple, así como su funcionamiento.

Finalmente, se presenta las fases que conforman la parte experimental de la investigación que se basan principalmente en la creación de probetas con características específicas y sujetas a condiciones que permiten la tener una experimentación controlada.

En la Fig. 6.1, en cada una de las fases se hicieron cambios en la variables y en las constantes, con el fin de observar el comportamiento de la velocidad de la onda P al cambiar el suelo, las longitudes de la probeta, los pesos volumétricos de la muestra, la humedad y obtener ecuaciones empíricas que correlacionará los valores de la velocidad de la onda P con el peso volumétrico de las muestras, además de

determinar si es factible el uso del método de VPU para suelos con las características aquí descritas.

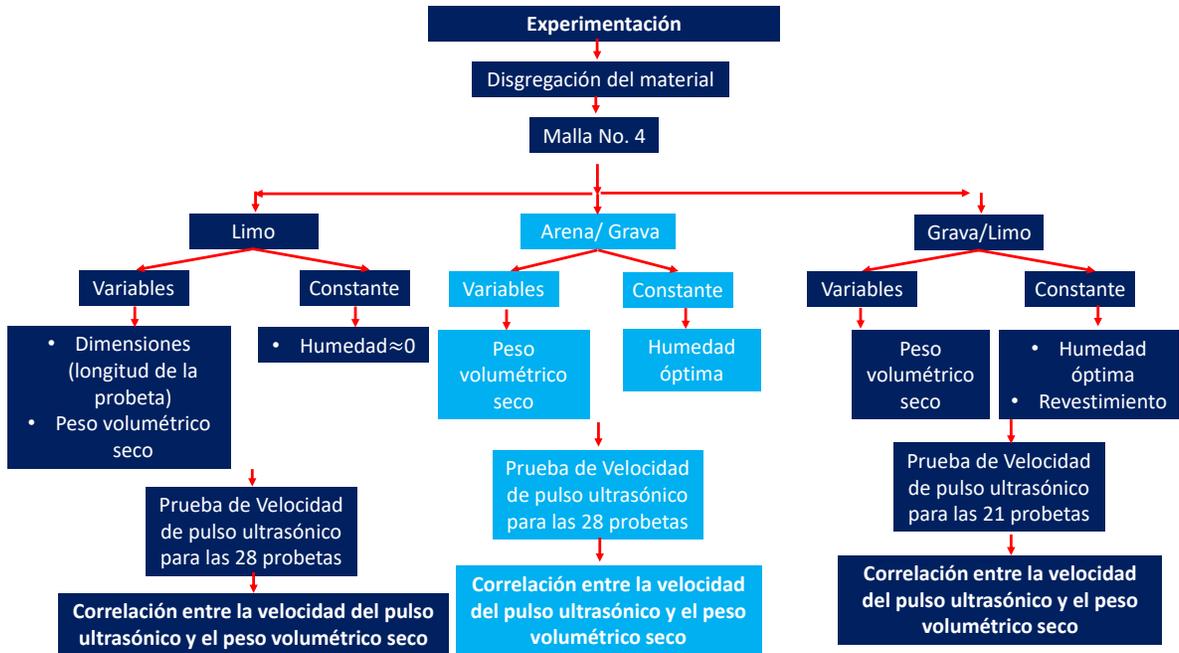


Figura 5.1 Metodología de la investigación

5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS

5.1.1. MUESTREO DEL SUELO

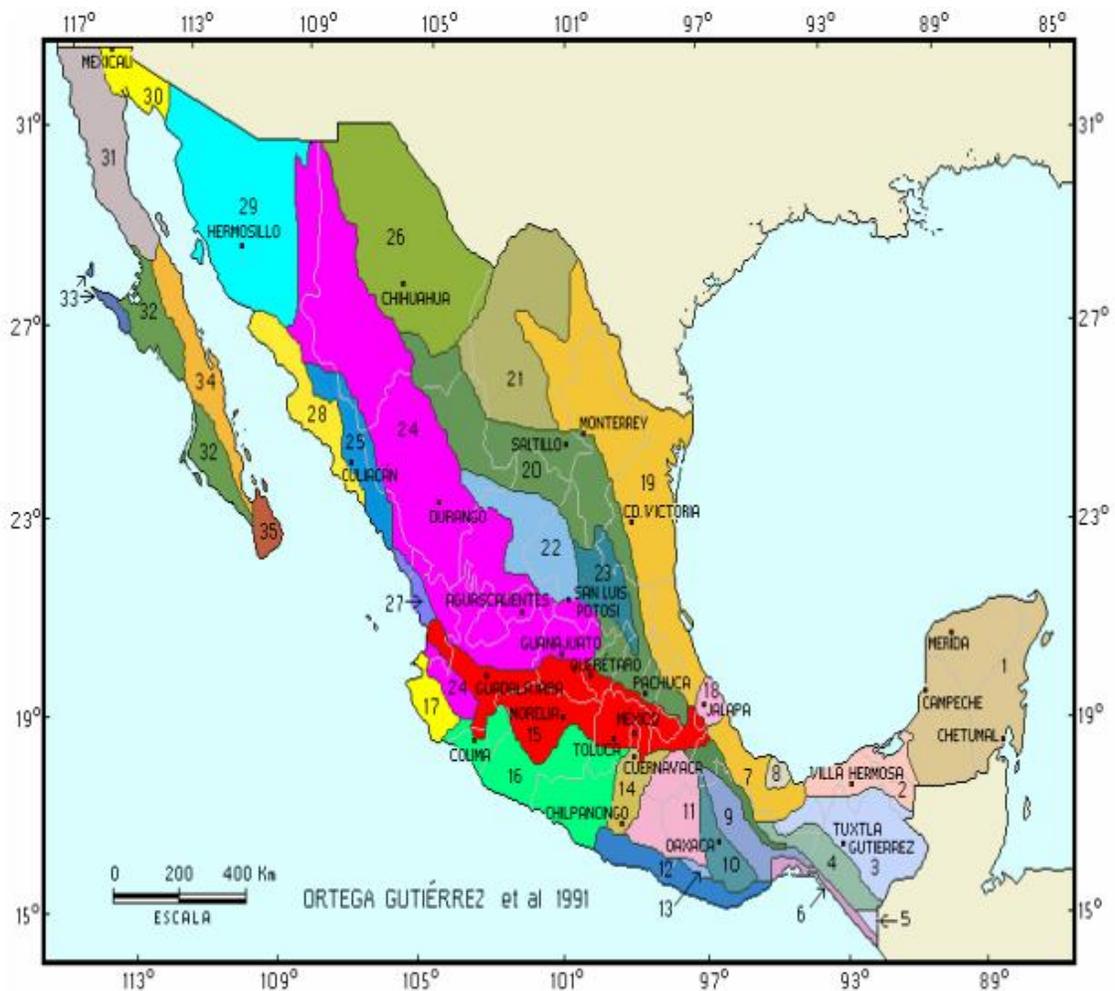
De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el estado de Querétaro se localiza en el Bajío, zona centro del país (ver la Fig. 5.2). El estado de Querétaro colinda con los Estados de Michoacán, Hidalgo, Guanajuato, San Luis Potosí y el Estado de México. Su superficie es de 11,769 Km² compuesto por 18 municipios y su capital es la ciudad Santiago de Querétaro (INEGI, 2021). En general, el clima es seco, con excepción de la parte norte del Estado en donde el clima es mayormente templado y lluvioso, por ello, el 55% de sus regiones naturales son semiáridas, el 25 % son templadas y el 20% restante son trópico seco, con una temperatura media anual de 18°C, una temperatura mínima de 6°C en el mes de enero y una temperatura máxima media de 28°C en los meses de abril y mayo (INEGI, 2021).



Figura 5.2 Estado de Querétaro y sus colindancias (INEI, 2021).

Geológicamente (ver Fig. 5.3), el Estado de Querétaro se encuentra entre los límites de las provincias geológicas de la Faja Volcánica Tansmexicana en la parte centro-norte; en la parte este limita con el Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas, así como con la Sierra Madre Occidental o también conocido como Faja Ignimbrítica Mexicana (Ortega et al., 1992).

Los periodos geológicos del municipio de Querétaro se distribuyen de la siguiente manera: Terciario-Cuaternario (48.17%), Neógeno (19.58%), Cuaternario (11.15%), Cretácico (2.12%) y Terciario (0.06%). El tipo de roca y/o suelo se tienen distribuidos de la siguiente manera: ígnea intrusiva: granodiorita (0.06%); ígnea extrusiva: basalto (20.88%), andesita (26.34%), toba ácida (6.01%), riolita-toba ácida (4.70%) y basalto-brecha volcánica básica (0.95%); metamórfica: esquisto (0.15%); sedimentaria: arenisca-conglomerado (8.87%), caliza (1.81%) y caliza-lutita (0.16%); y suelo: aluvial (11.15%) (Compendio de información geográfica municipal Querétaro, 2010).



- | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|--|---|
| 1. Plataforma de Yucatán | 10. Zapoteca | 19. Miogeoclinal del Golfo de México | 28. Cuenca Deltáica de Sonora-Sinaloa |
| 2. Cuenca deltáica de Tabasco | 11. Mixteca | 20. Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas | 29. Sonorense |
| 3. Cinturón Chiapaneco de Pliegues | 12. Chatina | 21. Plataforma de Coahuila | 30. Delta del Colorado |
| 4. Batolito de Chiapas | 13. Juchateca | 22. Zacatecana | 31. Batolito de Juárez-San Pedro Mártir |
| 5. Macizo Igneo del Soconusco | 14. Plataforma de Morelos | 23. Plataforma Valles-San Luis Potosí | 32. Cuenca de Vizcaíno-Purísima |
| 6. Cuenca de Tehuantepec | 15. Faja Volcánica Transmexicana | 24. Faja Ignimbrítica Mexicana | 33. Cinturón Orogénico Cedros-Vizcaíno |
| 7. Cuenca deltáica de Veracruz | 16. Complejo Orogénico de Col-Gro. | 25. Cinturón Orogénico Sinaloense | 34. Faja Volcánica de La Giganta |
| 8. Macizo Volcánico de los Tuxtlas | 17. Batolito de Jalisco | 26. Chihuahuense | 35. Complejo Plutónico de La Paz |
| 9. Cuicatteca | 18. Macizo Igneo de Palma Sola | 27. Cuenca de Nayarit | |

Figura 5.3 Mapa de las provincias geológicas en México. De color Rojo se distingue la Faja Volcánica Trasmexicana y en color rosado pastel se distingue la Sierra Madre Occidental. Fuente Ortea et al. (1991).

La primera muestra clasificada como limo (ML) de baja compresibilidad se extrajo del Campus de Pinal de Amoles de la Universidad Autónoma de Querétaro, ubicada al noreste del Estado de Querétaro. La extracción se realizó por medio de un sondeo superficial del tipo Pozo a Cielo Abierto (PCA), mediante una retroexcavadora, obteniendo una muestra inalterada de 60 kg (ver Fig. 5.4). Dicho proceso se llevó a cabo de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM-D420 (1993). El sondeo

se ubicó con un sistema posicionamiento satelital global (GPS) en coordenadas UTM, con coordenadas 435021.50 m E, 2337619.90 m N con 2359 m.s.n.m.



Figura 5.4 Obtención de una muestra de suelo inalterada a través de un pozo a cielo abierto (PCA).

El Campus de Pinal de Amoles de la Universidad Autónoma de Querétaro se localiza en el Municipio de Pinal de Amoles (ver Fig. 5.5). El Municipio de Pinal de Amoles se encuentra en una zona accidentada con pendientes pronunciadas, planicies pequeñas y mesetas. Debido a su naturaleza geológica, la topografía es muy variable, mostrando un rango de cotas de 839 m.s.n.m hasta 3,350 m.s.n.m. Además, la zona se caracteriza por la presencia de manantiales dispersos. De manera general, los suelos (arcillas y limos) se presentan sobreyaciendo a rocas del tipo calizas y rocas volcánicas ígneas; por lo tanto, la composición de los suelos es caliza en un 45% y solamente el 15% roca ígnea intrusiva ácida.

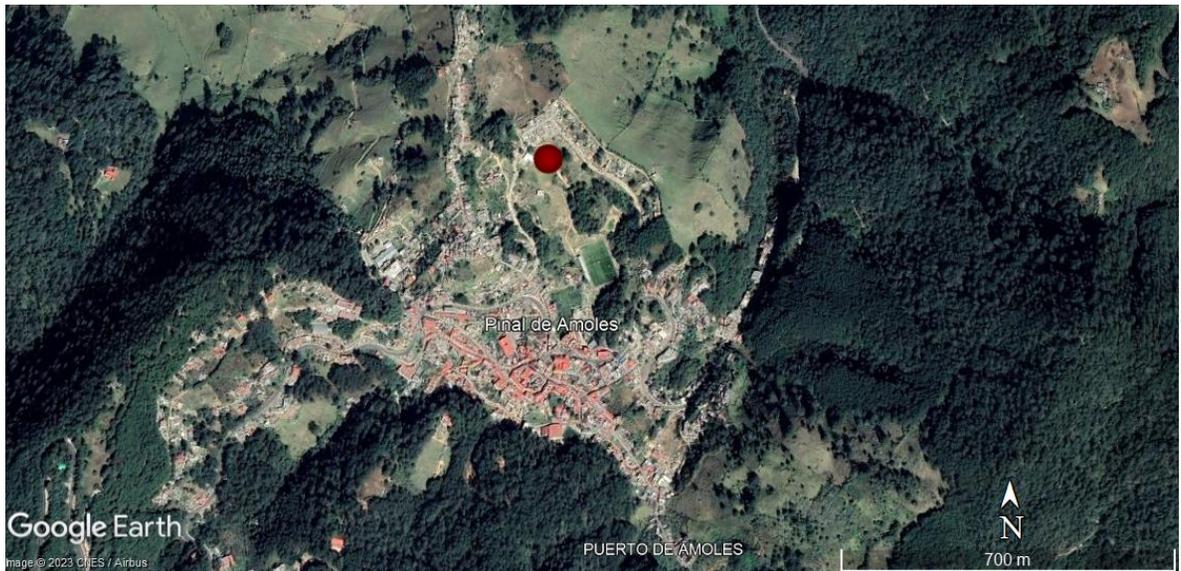


Figura 5.5 Localización del sondeo del tipo pozo a cielo abierto (PCA), en el municipio de Pinal de Amoles, Qro.

La segunda y la tercera muestra, conocidas comúnmente como “tepetate” y que al caracterizarse se clasificaron como arena limosa (SM) y grava limosa (GM) de acuerdo a la S.U.C.S, se obtuvieron de bancos de materiales en el Municipio de Querétaro; este material se usa para la construcción de plataformas o como rellenos en obras civiles. A continuación, en la tabla 5.1 se presenta la información proporcionada de los bancos de extracción de material, brindada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2022), así como la localización de cada uno. Ambos bancos de materiales se encuentran geológicamente en la cuenca sedimentaria que es delimitada tanto por fallas regionales que se agrupan en dos sistemas activos del mioceno como por volcanes. La estratigrafía superficial del valle está conformada por suelos (arcillas y limos) con diversos espesores, que descansan indistintamente sobre rocas de origen volcánico del tipo toba y/o basalto (Carreón-Freyre et al., 2005).

Tabla 5.1 Descripción general y localización de los bancos de materiales. Fuente: SCT, 2022.

Estado:	Querétaro		
Nombre del banco:	BANCO DE MATERIAL TLACOTE		
Kilómetro:	30000		
Ubicación:	LIBRAMIENTO SUR PONIENTE DE QUERÉTARO, KM 30+000		
Latitud:	20.663321	Longitud:	-100.51448
Desviación:	Izquierda	Metros:	100
Tipo de propiedad:	Particular		
Tipo de Material:	VOLCANICO		
Tratamiento:	Trituración total y cribado		
Volumen x 1000 (m³):	2	Espesor despalme (m):	0
Usos probables:	Terracerías, Base		
Uso de explosivos:	No requiere	Restricciones ecológicas:	No existen
Aspectos económicos:	Aceptable	Reporte calidad:	Reporte

Estado:	Querétaro		
Nombre del banco:	EL AMIGUITO		
Kilómetro:	20500		
Ubicación:	QUERETARO - SAN LUIS POTOSI, KM 20+500		
Latitud:	20.766562	Longitud:	-100.390402
Desviación:	Derecha	Metros:	5200
Tipo de propiedad:	Particular		
Tipo de Material:	CONGLOMERADO		
Tratamiento:	Trituración parcial y cribado		
Volumen x 1000 (m³):	120	Espesor despalme (m):	0.3
Usos probables:	Terracerías, Base		
Uso de explosivos:	Sin restricciones	Restricciones ecológicas:	No existen
Aspectos económicos:	Aceptable	Reporte calidad:	Reporte

5.1.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Antes de las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y compresión simple, se realizó una caracterización geotécnica a través de las pruebas de:

- Contenidos de agua. Determinado a partir de la norma ASTM D-2216
- Límites de consistencia (límite líquido y límite plástico). Determinado a partir de la norma ASTM D-4318.
- Tamaño de partículas (granulometría). A través del análisis de tamiz bajo la norma mexicana NMX-C-III-ONNCCE-2014 y análisis de hidrómetro determinado a partir de la norma ASTM D7928-16.
- Densidad Relativa (peso específico relativo de sólidos). Determinado a partir de la norma ASTM D-854.
- Prueba de compactación dinámica. A través de la prueba de compactación Proctor Modificada a partir de la norma ASTM D1557.

Descritas a continuación.

CONTENIDOS DE AGUA (NORMA ASTM D-2216).

Esta prueba se llevó a cabo en base a la norma ASTM-2216, que establece como primer paso determinar el peso de una tara (recipiente) seca y limpia (W_T), para después agregar una porción de suelo húmedo y volver a pesar el recipiente (W_T) más el peso del suelo con % de humedad (W_{SW}); posteriormente, se introduce la tara a un horno con una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de al menos 24 horas. Al término de este tiempo, se retira la tara con el suelo seco y se registra el peso total (peso de la tara, W_T , + suelo con 0% de humedad, W_{SD}).

Con los pesos obtenidos se prosigue a determinar el contenido de agua de la muestra con la ecuación 14.

$$W = \frac{W_{SW} - W_{SD}}{W_{SD} - W_T} \times 100 = \frac{W_W}{W_S} \quad (14)$$

En donde:

W = Contenido de agua (%)

W_{SW} = Peso del suelo con un % de humedad en gramos

W_{SD} = Peso del suelo seco (0% de humedad) en gramos

W_T = Peso de la tara limpia y seca en gramos

W_W = Peso del agua en gramos

W_S = Peso del suelo seco en gramos

LÍMITES DE CONSISTENCIA

Límite Líquido

El objetivo principal es buscar el porcentaje del suelo analizado correspondiente al estado líquido, todo el procedimiento se basó en la norma ASTM D-4318. Bajo la norma se realizaron los siguientes pasos:

Se disgrega una fracción de la muestra del suelo con una humedad baja, evitando el rompimiento de las partículas que conforman el suelo. Se continúa, pasando el material por la malla No. 40 hasta obtener una muestra con un peso entre 150 gr y 200 gr.

Para asegurar que la muestra absorba el agua, se le añade agua hasta alcanzar la consistencia deseada y se deja reposar durante 24 h.

Posteriormente, se mezcla el material hasta homogenizarlo en una cápsula de porcelana (ver Fig. 5.6). Después, se coloca el material aplicando cierta presión sobre la copa de Casa Grande; con la copa en la base del aparato, se nivela el material y se ranura atravesando todo el material como se muestra en la Fig. 6.5; es decir, el material debe estar dividido en dos secciones. Se comienza con el golpeteo de la copa con una velocidad de dos golpeteos por segundo. La prueba termina cuando ambas secciones de la muestra están en contacto. El proceso descrito anteriormente se realiza con muestras con diversas humedades que se aproximen a la humedad buscada.



Figura 5.6 Proceso para obtener el límite líquido de los materiales.

Como resultado, se obtiene un número de golpes por cada muestra con distinta humedad. Luego, estos datos se muestran gráficamente de manera semilogarítmica y se produce una curva entre estas variables. El límite líquido del suelo está representado por el contenido de humedad con la intersección de la curva y el valor de 25 en el número de golpes.

Límite plástico

Se realizó la prueba para la obtención del límite plástico de los suelos guiado por la norma ASTM D-4318, los pasos realizados se mencionan a continuación:

Sin perder demasiada humedad, se utiliza una porción de la muestra utilizada en la prueba de límite líquido. En una placa de vidrio se crea una bola de material y se frota ligeramente sobre la superficie para crear un rollo uniforme que se mantiene hasta que tenga un diámetro de aproximadamente 3 mm (ver Fig. 5.7).



Figura 5.7 Proceso para obtener el límite plástico de los materiales.

Se continua con el proceso de rodadura esperando que se rompa en pedazos como resultado de la pérdida de humedad. Cuando estos pedazos de rollo de suelo suman más de 6 gr se colocan sobre una tara limpia, seca y previamente pesada, para después colocarla en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Finalmente, la humedad se obtiene mediante el procedimiento mencionado anteriormente (Contenido de humedad, norma ASTM D-2216), esta humedad es la correspondiente al límite plástico.

Asimismo, se obtuvo el índice plástico de la diferencia entre el contenido de humedad del límite líquido y el límite plástico.

TAMAÑO DE PARTÍCULAS (GRANULOMETRÍA)

Se utilizaron las pruebas de análisis granulométrico por mallas e hidrómetro para determinar la distribución de las partículas de los tres diferentes tipos de suelo estudiados.

El primer procedimiento, un análisis granulométrico por mallas, se completó de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-III-ONNCCE-2014, y el segundo procedimiento, un análisis granulométrico por hidrómetro, se completó de acuerdo con la norma ASTM D7928-16.

El primer procedimiento se usa para identificar las partículas más grandes del suelo, en este caso se realiza para determinar el porcentaje de las partículas retenidas en la malla mayores al No. 4, que se conocen como gravas de acuerdo a la S.U.C.S.

Se parte del secado del material al aire libre, se toma una muestra representativa, una cuarta parte del material total. Esta muestra se obtiene del cuarteo del suelo, que consiste en crear un cono con el material en una caída suave y suelta, para después separarlo en cuatro partes iguales. Después el material se criba por las mallas 3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 3/8" y No. 4. Cada que el material pasa por una malla, se hace un registro del peso del material que pasa a través de ella y del material retenido en ella.

Luego, se continua con el análisis granulométrico por hidrómetro para determinar el porcentaje de suelo fino del suelo. La norma ASTM D7928-16 proporciona la ecuación 15.

$$M_{mest} = H_c * \left(\frac{100}{\%est} \right) * \left(1 + \frac{\omega_{cest}}{100} \right) \quad (15)$$

En donde:

M_{mest} = Material húmedo estimado

H_c = Capacidad del hidrómetro, (45 para hidrómetros 151 H o 55 para hidrómetros 152 H)

$\%est$ = Porcentaje estimado del material que pasa la malla No. 200

ω_{cest} = Contenido de humedad estimado

Esta ecuación ayuda a determinar cuánto material debe ser utilizado durante la prueba del hidrómetro teniendo en cuenta que sólo se debe usar el material que pasa por Malla No. 4. Al determinar la cantidad de material se continúa con la saturación del suelo durante 24 h. Para dispersar los grumos que se crean entre las partículas del suelo, se prepara una probeta de 1,000 ml con 5 gr de hexametáfosfato de sodio disueltos. Cuando el material alcanza la saturación, se agrega a la probeta, se sella con un tapón y luego se agita 60 veces en forma giratoria (ver Fig. 5.8).



Figura 5.8 Proceso para obtener la distribución de las partículas a través del hidrómetro.

Luego, sobre una superficie plana se coloca la probeta e inmediatamente se introduce un hidrómetro previamente medido. Se toman lecturas de tiempo y temperatura en los tiempos 1, 2, 5, 8, 15, 30, 60, 240 y 1440 segundos después de la agitación. Después de cada lectura, el hidrómetro se mantiene a la par en otra probeta que contiene sólo agua. En la cual, también se realizan lecturas para posteriormente de calibrar las lecturas por temperatura.

Al termino de todas las lecturas, se hace una corrección por temperatura y menisco con los que se establecerá el porcentaje de partículas que corresponden a cada diámetro igual o menores a 0.074 mm, es decir, se obtiene el porcentaje de finos del suelo.

Finalmente, para tener el porcentaje correspondiente a las arenas y completar la distribución total, se usa todo el material del hidrómetro y, a partir del análisis granulométrico por mallas (Norma Mexicana NMX-C-III-ONNCCE-2014 y la norma ASTM D7928-16) se realiza el tamizado por obtener los datos y completar la distribución de las partículas. El proceso se describe a continuación:

Después de un secado completo del material (0% de humedad, norma ASTM D-2216), el suelo se pasa por las mallas No. 10, 20, 40, 60, 100 y 200, y de igual forma, se calcula el porcentaje del material que pasa en cada malla y el porcentaje del suelo que se retiene en cada una, con respecto a la masa total de material (ver Fig. 5.9).



Figura 5.9 Proceso para obtener la distribución de las partículas a través de mallas.

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SÓLIDOS (S_s)

El peso específico relativo de los sólidos, también conocido como densidad de los sólidos, es la fase sólida de los suelos y es un valor adimensional. Para determinar la densidad de sólidos de los materiales se siguió la norma ASTM D-854 usada para suelos finos.

Una porción de suelo que pase la malla No. 4 (4.75 mm) debe someterse a un proceso de secado. Cuando el material esté completamente seco, se toma una

muestra de 50 gr, se coloca en una tara y se satura por 24 h con un sobrante de 1cm de agua por encima de la superficie de la muestra.

En este tiempo, se realiza la calibración de un matraz a partir de una curva que relaciona el volumen del matraz aforado con agua a diferentes temperaturas con su respectivo peso, debido a que los matraces contienen diferentes volúmenes de agua dependiendo de la temperatura en la que se encuentren.

Para realizar esta prueba es necesario dos matraces limpios y secos. El material saturado deber ser vertido en el matraz previamente calibrado, asegurando que no haya perdida de material y el segundo matraz debe contener sólo agua, para después hervir los matraces en un baño de agua, para evitar el contacto directo con el fuego hasta alcanzar una temperatura igual o mayor de 80°C. A continuación, los matraces se someten a una bomba de aire para extraer el aire contenido en el agua, se afora el matraz calibrado con el suelo, se pesa y se toma la temperatura. Este procedimiento se realiza varias veces para obtener un resultado más representativo.

Los resultados obtenidos se ajustan de acuerdo a la calibración del matraz y se tiene el peso específico relativo.

PRUEBA DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADA

La prueba de compactación Proctor modificada permite encontrar la humedad óptima (ω_{opt}) y el peso unitario seco máximo (γ_{dmax}) al seguir el procedimiento indicado en la norma ASTM D1557-09.

La prueba se realiza de la siguiente manera:

Se disgrega el material cuidando no romper las partículas del suelo, se seca al aire libre y se criba por la malla No. 4. Del material que pasa dicha malla, se separa una cantidad de aproximadamente de 4.0 kg, obteniendo 5 muestras con este peso.

Cada muestra de se coloca en una bolsa se le añade diferentes cantidades de agua con la finalidad de tener muestras de suelo con humedades que se aproximen a la humedad óptima, después se deja reposar la muestra con el agua por 24 h.

Después de haber transcurrido las 24 h de reposo con el agua, se homogeniza y se fracciona en 5 partes equitativas. Por otra parte, en cuanto al molde, se pesa previamente el cilindro con la placa base, sin la parte superior (collar) como se muestra en la Fig. 5.10. Posteriormente, cada parte se pone dentro del molde y se aplican 25 golpes con un pistón siguiendo el orden que se muestra en la Fig. 5.10.

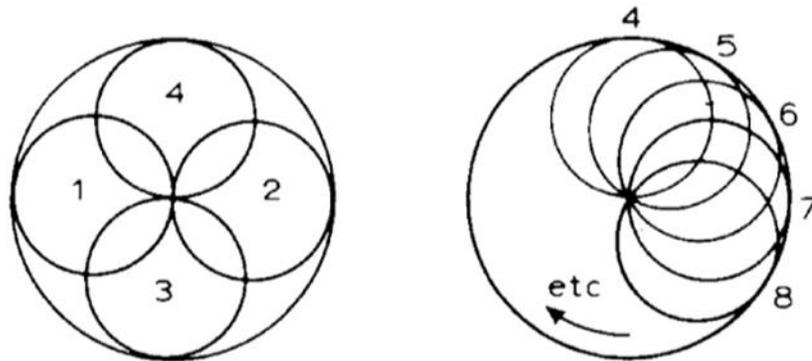


Figura 5.10 Patrón y distribución de los golpes para la compactación Proctor Modificada. Fuente: Norma ASTM D1557-09.

Entre cada capa de suelo se escarifica la superficie y se realiza nuevamente la compactación con el pistón siguiendo el patrón, al terminar todas las capas se remueve la parte superior del cilindro, se enrasa la superficie (ver Fig. 5.11) y se limpia todo el material residual esparcido en la superficie del molde, para posteriormente pesar el molde con el material compactado; por último, se obtiene un testigo de humedad para determinar el contenido de agua.



Figura 5.11 Proceso de la prueba de compactación

Este procedimiento se reproduce con todas las muestras de suelo con diferentes contenidos de humedad. Al término de la prueba se obtiene un gráfico que corresponde a la curva de compactación.

Para la obtención de esta curva se calcula la densidad de la muestra compactada y el porcentaje de humedad a partir de la ecuación 16.

$$\rho_m = \frac{P_t - P_{md}}{V} \quad (16)$$

En donde:

ρ_m = Densidad de la muestra húmeda compactada (kg/m³)

P_t = Peso del suelo húmedo en el molde y el molde (kg)

P_{md} = Peso del molde de compactación (kg)

V = Volumen del molde (cm³)

Después se prosigue a determinar el peso unitario seco de cada muestra con la ecuación 17.

$$\gamma_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{W}{100}} \quad (17)$$

En donde:

γ_d = Peso unitario seco de la muestra compactada (kg/m³)

ρ_m = Densidad de la muestra húmeda compactada (kg/m³)

W = Humedad de la muestra de suelo (%)

Con los cálculos se tiene el peso unitario seco y la humedad de cada una de las muestras, con el que se crea el gráfico que relaciona estos datos. En el gráfico se observa un punto máximo representativo al peso unitario seco máximo (γ_{dmax}), la cual corresponde a la humedad óptima (ω_{opt}).

5.2. EQUIPO DEL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

El ensayo por ultrasonido es una técnica no destructiva, lo que significa que el ensayo se puede realizar sin afectar las propiedades físicas, químicas, mecánicas o geométricas del material, es decir, no hay riesgo de daño ni modificación. Este estudio se basa en el fenómeno físico de la transmisión de ondas ultrasónicas, aquellas ondas sonoras que no pueden ser percibidas por los humanos.

Cabe destacar que las pruebas de VPU se realizaron en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (ver Fig. 5.12). El IMT es una institución referente a nivel nacional e internacional, la cual provee soluciones al sector transporte y logístico en México, contribuyendo al desarrollo del país a través de: investigación aplicada; servicios tecnológicos y de laboratorio; producción de normas, manuales y metodologías; formación de post-profesional; y difusión de los resultados y conocimientos adquiridos.



Figura 5.12 Instituto Mexicano del Transporte

5.2.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ULTRASÓNICO

El instrumento ultrasónico utilizado es el Controls Modelo 58: E0048 Ultrasonic Pulse Velocity Test, el cual tiene un rango de frecuencia de 24 kHz a 150 kHz con una precisión de $0.1\mu s$ (ver Fig. 5.13). El equipo consta principalmente de un generador de pulsos eléctricos, dos transductores ultrasónicos (palpadores), un amplificador y un temporizador eléctrico que mide el tiempo que tarda la onda de sonido primaria en viajar desde el transductor emisor hasta el transductor receptor mientras pasa por el material entre ellos. Complementado, con un cilindro de poliestireno de 25 cm usado para la calibración del equipo. Además, es necesario tener un acoplador que permita un contacto adecuado entre la superficie del espécimen y del transductor, en este caso se utilizó un gel antibacterial que, por su viscosidad cumple con esta función al eliminar el aire.

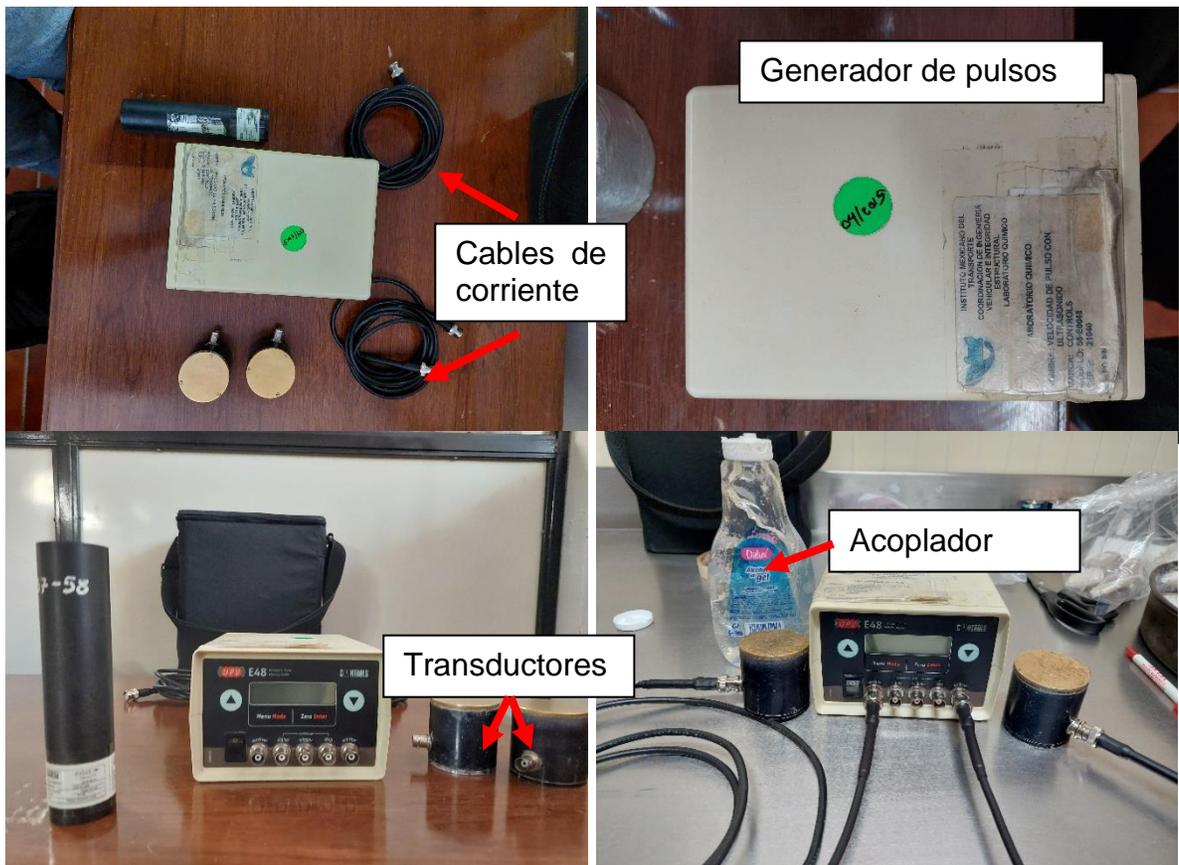


Figura 5.13 Equipo usado para la prueba de Velocidad de Pulso ultrasónico perteneciente al IMT.

Los dos transductores, cada uno con una frecuencia de 54 kHz, pueden funcionar como emisor o receptor y son intercambiables, dependiendo en qué forma se conecten al equipo, para esta conexión se usan cables de corriente eléctrica con un conector tipo BCN. La frecuencia de 54 kHz es necesaria para proporcionar una medición precisa. Es importante mencionar que con la disminución en la frecuencia habrá una disminución de la energía y la amortización de la señal.

5.2.2. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.

Actualmente, en México no existe una norma que rijan el uso del método de VPU en suelos. Por lo tanto, se realizó la prueba conforme al manual del equipo para la medición en muestras de concreto.

Se optó por hacer mediciones de la velocidad del pulso ultrasónico mediante un método de transmisión directa, que consiste en colocar dos transductores en lados opuestos del material, uno de los cuales sirve como emisor y el otro como receptor de la onda primaria, como se describe en el capítulo 4.4.2 “Métodos de los ensayos no destructivos ultrasónicos”. Debido a que la onda se propaga en línea recta y la distancia entre los transductores es la más corta, la técnica de transmisión directa permite que la máxima cantidad de energía vaya de un punto a otro. Como resultado, las lecturas son más precisas y fiables que con las otras dos técnicas.

El equipo de velocidad de pulso ultrasónico tiene la capacidad de trabajar con la onda primaria o longitudinal, dicha onda se propaga perpendicularmente al plano del transductor, y la energía que transporta esta onda es la de mayor valor con respecto a los otros tipos de ondas. La manera en que el equipo genera las ondas ultrasónicas, básicamente es enviar pulsos eléctricos que llegan al transductor emisor, el cual por sus propiedades piezoeléctricas convierten la energía eléctrica en pulsos ultrasónicos o vibraciones de alta frecuencia que viajan por la muestra, después las señales son recibidas por el transductor receptor que genera un pulso eléctrico a partir de la excitación del cristal piezoeléctrico por las vibraciones de la onda primaria, posteriormente el pulso eléctrico pasa por el amplificador y finalmente es posible tener una lectura de tiempo en μs mostrada en la pantalla del equipo.

Antes de iniciar la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, es crucial validar que el equipo esté calibrado. Para ello, se inicia colocando una capa delgada de gel antibacterial en las caras opuestas del cilindro de calibración fabricado con poliestireno, posteriormente se colocan los transductores sobre las caras planas del cilindro y el equipo debe registrar una lectura entre $57 \mu s$ y $58 \mu s$ (ver Fig. 5.14).



Figura 5.14 Cilindro de calibración. Fuente: Propia.

El manual del equipo aconseja que la superficie del material que será sometido a inspección sea lo más lisa y limpia posible (libre de suciedad, humedad, grietas y cualquier otro producto); sin embargo, debido a la naturaleza de los especímenes de suelo, todas estas recomendaciones no pueden ser posibles, por lo que, se colocó una capa más gruesa de acoplante, debido a que el uso de una capa delgada de acoplante sobre la superficie de la muestra es absorbida rápidamente por el material (suelo) impidiendo la adherencia que se requiere entre la muestra y el transductor. La muestra se sitúa entre los transductores con acoplante en cada una de sus caras. Dichos transductores son situados en las caras planas opuestas del material en forma de cilindro, ejerciendo presión sobre los tres componentes (el transductor emisor, la muestra de suelo y el transductor receptor). Debido a que la presión ejercida sobre los transductores puede afectar las lecturas de velocidad, es necesario mover los transductores ligeramente mientras se mantiene una presión constante para obtener un valor estable y realizar al menos tres lecturas para obtener datos más confiables y precisos; sin embargo, para las probetas de suelo clasificado como grava limosa, se agregó un revestimiento plástico con rigidez, que permitió que el suelo mantuviera su forma, debido a que las probetas sin revestimiento colapsaban como se muestra en la Fig. 5.15.



Figura 5.15 Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico y desintegración de probetas de arena limosa y grava limosa.

La variable en este ensayo será principalmente la VPU. Esta variable se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{d}{t} \quad (18)$$

En donde

d = distancia entre un transductor y otro, es decir, longitud de la muestra a ensayar

t = tiempo en el que tarda la onda primaria en recorrer la longitud de la muestra, para llegar de un transductor al otro

5.3. EQUIPO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA O COMPRESIÓN SIMPLE

5.3.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo de resistencia a la compresión no confinada o compresión simple, es una prensa que se conforma de: marco de carga, anillo de carga, micrómetros, probeta de suelo, vástago, placa superior (cabezal), pedestal y generador de cargas como se muestra en la Fig. 5.16.

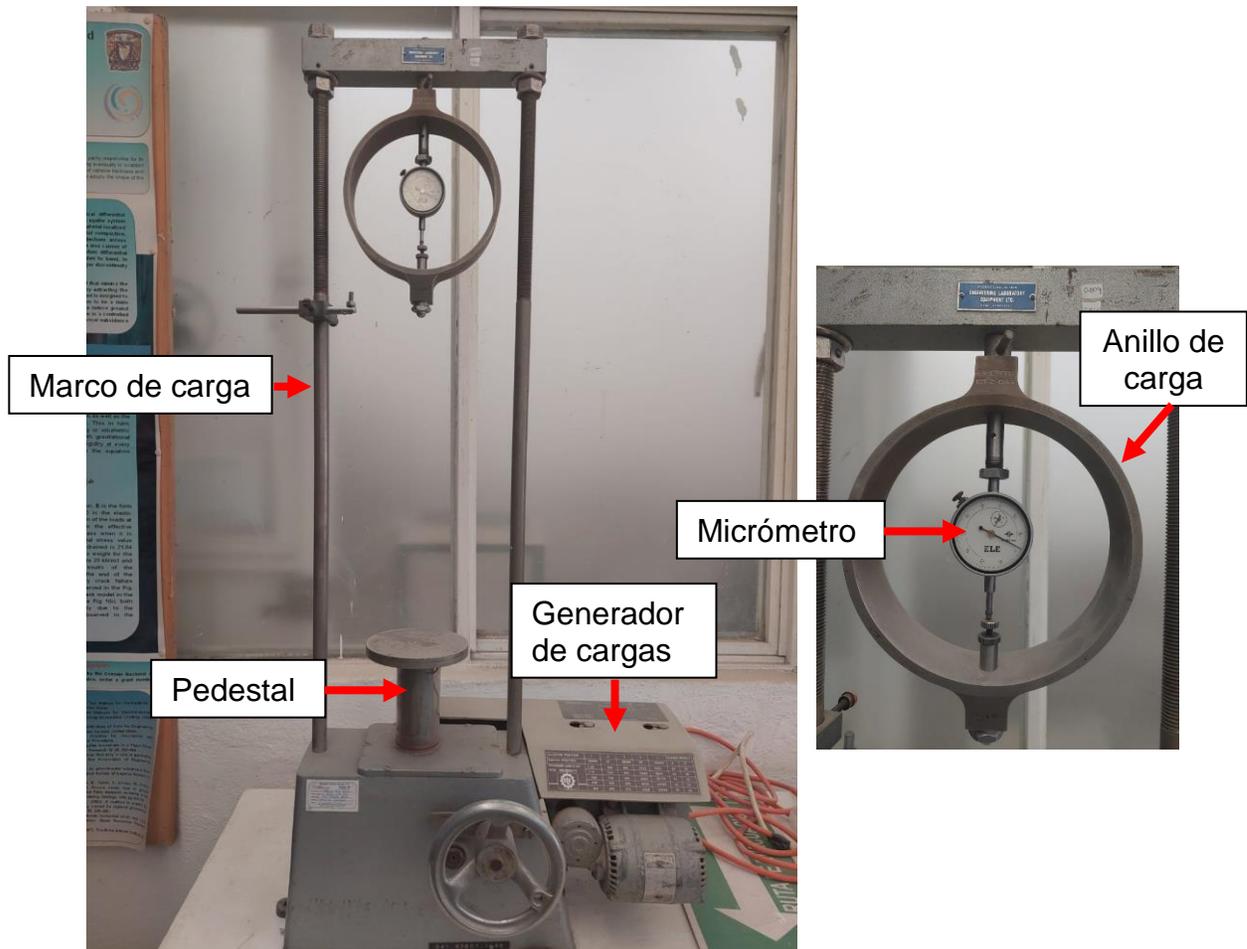


Figura 5.16 Prensa para la prueba de resistencia a la compresión no confinada o compresión simple en el laboratorio de geotecnia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Las pruebas de resistencia de compresión no confinada, se realizaron en el laboratorio de geotecnia, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

5.3.2. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

Los ensayos de compresión simple o compresión no confinada se realizan bajo la norma de ASTM D2166 para suelos cohesivos. La finalidad del ensayo es encontrar la resistencia al esfuerzo cortante de suelos cohesivos o semi-cohesivos aplicando una carga axial controlada a una velocidad determinada a una probeta sin confinamiento ($\sigma_3 = 0$) y en condiciones no drenadas, para obtener la carga máxima sin llegar a la falla (deformación no deseable), así que se considera un ensayo uniaxial. En la Fig. 5.17 se muestra el equipo para la realización del ensayo para una muestra de suelo.



Figura 5.17 Proceso de la prueba de compresión simple, montaje, prueba y falla de una probeta de limo (ML).

La gráfica de esfuerzo-deformación unitaria muestra los valores que corresponden a la deformación con respecto a la deformación unitaria.

Para obtener estos valores se tiene la siguiente teoría, de acuerdo a la norma ASTM D2166.

La deformación vertical se calcula como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (19)$$

En donde:

Δl = Deformación vertical de la muestra (mm), cambio en la longitud

l_0 = Longitud inicial de la muestra (mm)

Considerando que no hay cambio en el volumen de la probeta de suelo, el área de la probeta se ve afectada y se deforma cuando se aplica la carga axial. Por esta razón, el área (A , área corregida) se calcula utilizando la ecuación 20.

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (20)$$

En donde:

A_0 = Área transversal inicial de la muestra (cm²)

ε = Deformación unitaria (%)

Posteriormente, se calcula el esfuerzo principal mayor σ_1 para cada carga que se aplica sobre la probeta con la ecuación 21.

$$\sigma_1 = \frac{C_T}{A} \quad (21)$$

En donde:

C_T = Carga total aplicada en la probeta (kg)

A = Área transversal corregida de la probeta (cm²)

Con dichos datos calculados se hace la curva esfuerzo-deformación, donde el eje de las ordenadas se tiene los esfuerzos de compresión y en el eje de las abscisas

se tienen las deformaciones unitarias. En el gráfico se escoge el valor más grande del esfuerzo de compresión, considerando lo como la resistencia a la compresión no confinada (q_u).

Con dicha información se obtiene la resistencia al corte (C_u) que en este caso es igual a la cohesión de las probetas de suelo sometidas al ensayo, descrito en la ecuación 22.

$$C_u = \frac{q_u}{2} \quad (22)$$

Debido a que no hay confinamiento, es decir, que $\sigma_3=0$, el ángulo de fricción es 0, que se puede observar en la Fig. 5.18.

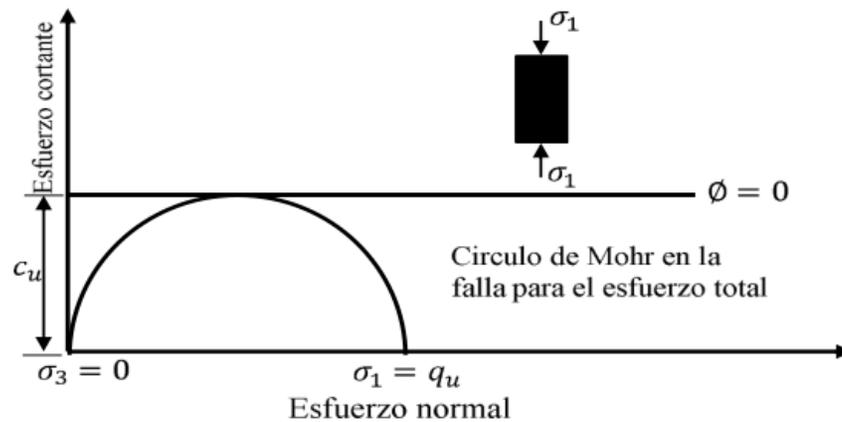


Figura 5.18 Prueba de compresión simple. Fuente: Das, B (2013).

De acuerdo a la norma ASTM D2166, se deben de tener en cuenta las siguientes consideraciones al realizar esta prueba:

En esta investigación las probetas fueron del tipo remoldeadas, puesto que, dentro de los objetivos de la investigación, se tiene como variable las densidades del material, así como la relación largo/diámetro, esta relación está en el rango entre 0.5 a 3.0.

Para las probetas con humedad se recomienda que se encuentren dentro de un envoltorio que impida la pérdida de humedad hasta el momento del ensayo.

Se deben tomar tres a cuatro medidas del diámetro y, de la altura, además se deberá pesar cada probeta antes del ensayo.

Al colocar la probeta en la base del equipo, es necesario nivelar y alinear las caras de la probeta antes de colocar el cabezal en la cara superior, para evitar lecturas incorrectas.

Asegurarse que tanto el micrómetro que indica la deformación, así como la carga se encuentren en cero.

Durante la prueba se debe anotar las lecturas de la deformación y de la carga, hasta el punto en el que suceda los siguientes casos:

- La carga sobre la probeta de suelo disminuye significativamente.
- Para cuatro lecturas de tiempo, la carga se mantiene en un mismo valor.
- La deformación es mayor del 20% de la deformación unitaria.

Las lecturas de la deformación y de la carga deben ser suficientes para permitir la observación del comportamiento de la curva esfuerzo-deformación.

Finalmente se debe determinar el valor de q_u en cada ensayo y como resultado se debe calcular el valor de C_u .

5.4. EXPERIMENTACIÓN

La investigación se enfoca en realizar variaciones principalmente físicas en las probetas de los tres suelos bajo análisis, con el fin de comprender el comportamiento de las ondas ultrasónicas (ondas primarias). Por ello, a continuación, se describe cada una de las fases que conforman el proceso de experimentación. En cada fase es posible observar las correlaciones con cada variación que se implementó.

Debido a que no existe actualmente en México una norma que señale los parámetros adecuados con los que se deba realizar una prueba de velocidad de pulso ultrasónico en suelos, la primera fase tiene como objetivo determinar cuál es la respuesta de la velocidad del pulso ultrasónico con diferentes longitudes de las probetas. En la Fig. 6.19 se presenta el diagrama del proceso efectuado en esta fase.

Para la Fase I se utilizó solo el material clasificado por sus propiedades índice y su granulometría de acuerdo a la S.U.C.S como limo de baja compresibilidad (ML).

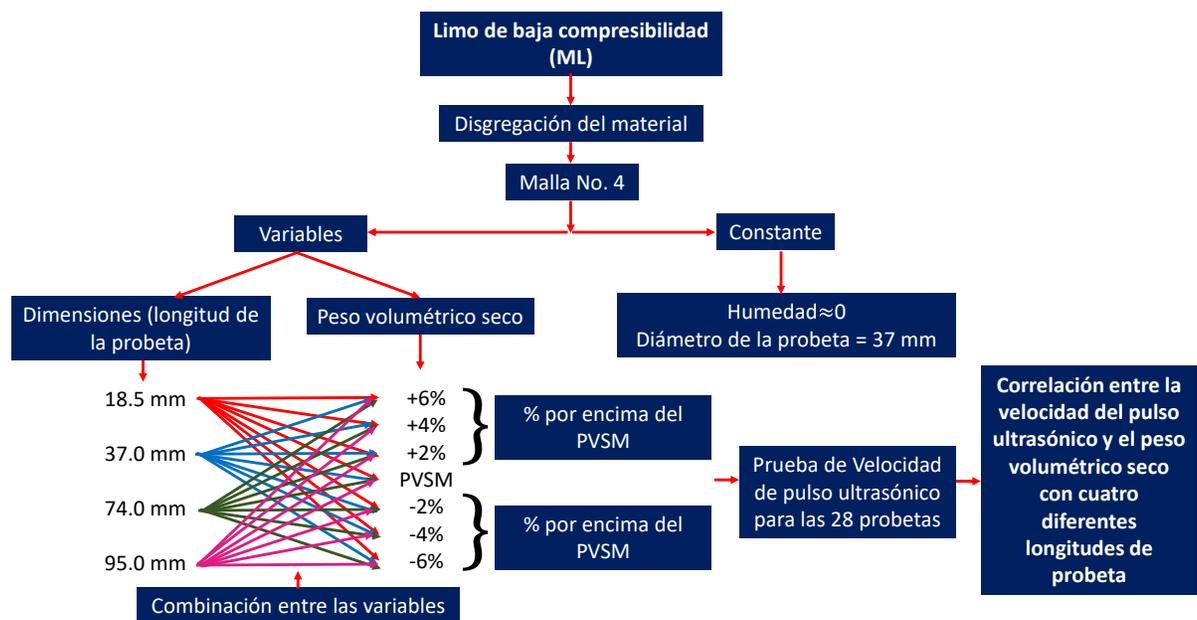


Figura 5.19 Diagrama del proceso de la FASE I de la experimentación. Fuente: propia.

La Fig. 5.19, indica que la experimentación comienza con la disgregación del material seco (humedad $\approx 0\%$) con el cuidado de no romper las partículas, después se pasa por la malla del No. 4 y a continuación, se prosigue a colocarlo en una bolsa y agregar la cantidad de agua requerida para tener la humedad óptima del limo (ML) y se deja reposar por un tiempo mínimo de 24 h. Al finalizar este proceso, se comienza con la creación de las probetas utilizando el molde para el remoldeo de probetas de la prueba triaxial, en donde se mantiene un diámetro constante de 37mm y se tienen variaciones en las longitudes de probeta de 18 mm, 37 mm, 74

mm y 95 mm, es decir, con relación de longitud/diámetro de 1:0.5, 1:1, 1:1.5 y 1:2 (la última relación no se cumplió debido a que el molde no permitió una longitud mayor a 95 mm); así como variaciones en porcentajes de 2%, 4% y 6% mayores y menores con respecto al peso volumétrico seco máximo (PVSM) obtenido de la prueba Proctor modifica (ver Fig. 5.20).



Figura 5.20 Probetas con diferentes longitudes y peso volumétricos secos con una humedad $\approx 0\%$.

Al término de este proceso se deja que las probetas pierdan su humedad de forma gradual, al comenzar con un secado con una franela con humedad por encima de las probetas por un periodo de tres días y continuando con un secado al aire libre. Cuando las probetas pierden su humedad, se someten a la prueba no destructiva velocidad de pulso ultrasónico.

De acuerdo a las lecturas obtenidas en la prueba VPU, se determina a velocidad con la que viaja la onda ultrasónica primaria (onda P). Para encontrar la correlación entre la velocidad de la onda P y el peso volumétrico unitario con el fin de generar un gráfico y una línea de tendencia que indique cual es la relación de las variables con cada una de las longitudes de probeta. Los resultados se muestran en el capítulo “Resultados de la fase I” de este documento.

La fase II de la experimentación se realizó en dos materiales, arena limosa (SM) y grava limosa (GM), clasificados por sus propiedades índice (límites de consistencia) y su granulometría de acuerdo a la S.U.C.S.

El alcance de la fase II se enfoca en determinar cuál es cambio que produce la humedad en la velocidad de la onda ultrasónica P manteniendo un cambio en los pesos volumétricos de las probetas.

Por ello, en la fase II se hace un cambio en la humedad, es decir, las muestras tuvieron una humedad igual a la humedad óptima obtenida de la prueba Proctor Modificada de cada material. Sin embargo, las longitudes de las probetas se reducen a dos. Estas longitudes se seleccionan por tener una mejor correlación entre las variables de velocidad de onda P y el peso volumétrico de la muestra de la fase I. A continuación, se muestra en la Fig. 5.21 el procedimiento que se siguió en la fase II de la experimentación.

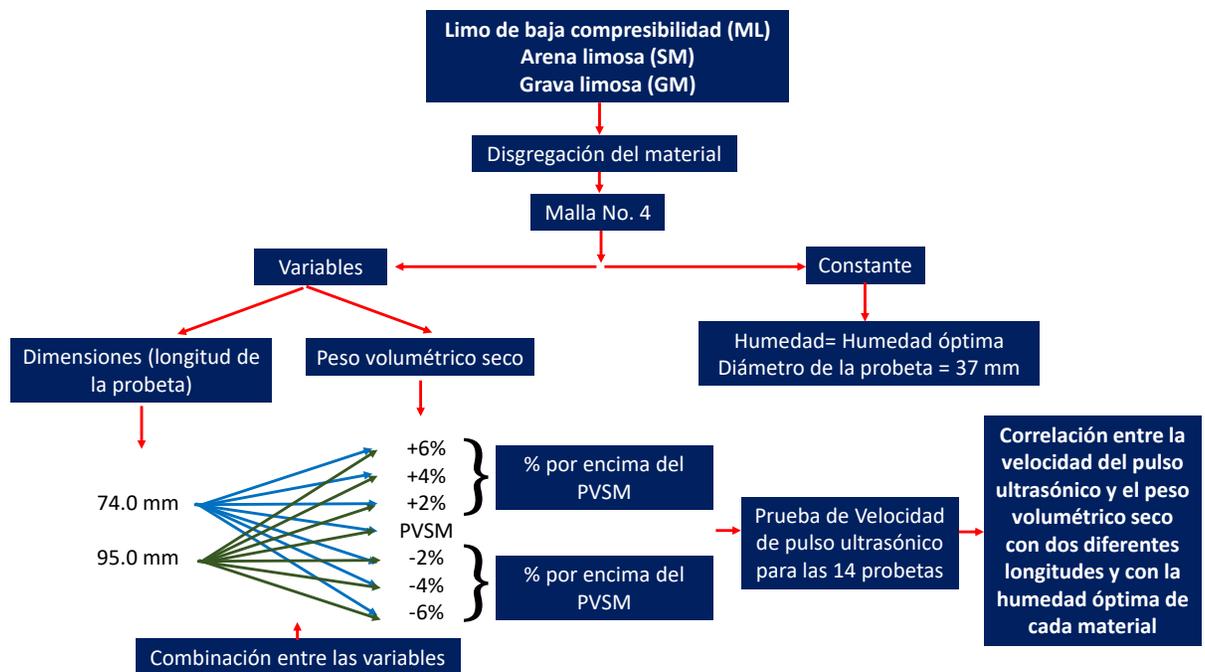


Figura 5.21 Diagrama del proceso de la FASE II de la experimentación. Fuente: propia.

La Fig. anterior muestra el procedimiento de la fase II, la cual se inicia con la disgregación de los materiales en estado seco (humedad del 0%) sin romper las partículas del suelo, luego los materiales se criban por la malla No.4. Después se procede a añadir el agua necesaria para que cada material tenga su humedad óptima y se deja reposar por un periodo de 24 h.

La creación de las probetas se realiza con el molde de remoldeo de probetas de la prueba triaxial, manteniendo un diámetro de 37 mm, pero cambiando los pesos volumétricos de la misma forma que en la fase I, a diferencia que sólo se limita a realizar probetas con una longitud de 74 mm y 95 mm.

Debido a que debe mantenerse la humedad, cada probeta se cubre con plástico, se sellan los bordes, se cuida de no perder material y se mantiene en una habitación con humedad controlada, como se muestra en la Fig. 5.21.

Al tener todas las probetas con humedad óptima del material, se ensayan en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico tomando como mínimo tres lecturas, finalmente se realiza la prueba de contenido de humedad para conocer el contenido de agua de cada probeta de acuerdo a la norma ASTM D-2216.



Figura 5.22 Recubrimiento de las probetas de suelo para evitar la pérdida de humedad.

La fase III se crea debido a que no es posible la fabricación de probetas en materiales gruesos, en este caso, para el material definido como grava limosa (GM). El procedimiento es el mismo que el de la fase II, con la excepción de que, al hacer las probetas, es necesario colocar una hoja de acetato dentro del molde de remoldeo para garantizar que la probeta no colapse (ver Fig. 5.23), en esta fase, se procuró que las hojas de acetato tuvieran las mismas medidas que la probeta.

Con el objetivo de conocer si el recubrimiento afecta o no a las lecturas de la velocidad por el contacto con la hoja del acetato, se deben crear probetas con las mismas condiciones de las fases anteriores del Limo (ML), se realiza el recubrimiento con la hoja de acetato y se someten nuevamente a la prueba de VPU.



Figura 5.23 Recubrimiento de las probetas de grava limosa y limo (ML) con hojas de acetato

Como cuarta fase se busca encontrar la relación entre la resistencia al corte y la velocidad de las ondas P. Para esta parte del proceso, se reutilizarán las probetas usadas en la prueba no destructiva de VPU. A continuación, se describe la metodología a seguir para realizar la prueba de compresión simple:

Al finalizar la prueba de VPU las probetas se vuelven a recubrir con plástico para no perder humedad, (en caso de tener humedad), hasta el momento de ser sometidas a la prueba de compresión simple.

El ensayo se lleva de acuerdo a la norma ASTM D-2166, descrito en el capítulo “Procedimiento del ensayo de compresión simple” de este documento.

Finalmente, al término de cada corrida de compresión simple, se toma un testigo de humedad, para el registro de la prueba y finalmente se realizan los cálculos para obtener la resistencia al corte para cada probeta.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En base a la metodología descrita previamente, en este capítulo se presenta las características de los suelos, así como los resultados de la aplicación de la prueba destructiva compresión simple y de la prueba no destructiva VPU.

La correlación entre las variables, las líneas de tendencia, así como las ecuaciones empíricas que relacionan el peso volumétrico y la velocidad de la onda P para cada una de las longitudes de la probeta, se muestran esta sección.

Con los datos recopilados y el análisis, se presenta y describe el comportamiento de la velocidad de la onda P para las cuatro longitudes sugeridas de las muestras de limo (ML), con diferentes pesos volumétricos con una humedad menor al 1,5%.

A continuación, en la tabla 6.1 se muestran las propiedades índice de los materiales con los cuales se clasificó cada uno de los materiales de acuerdo S.U.C.S.

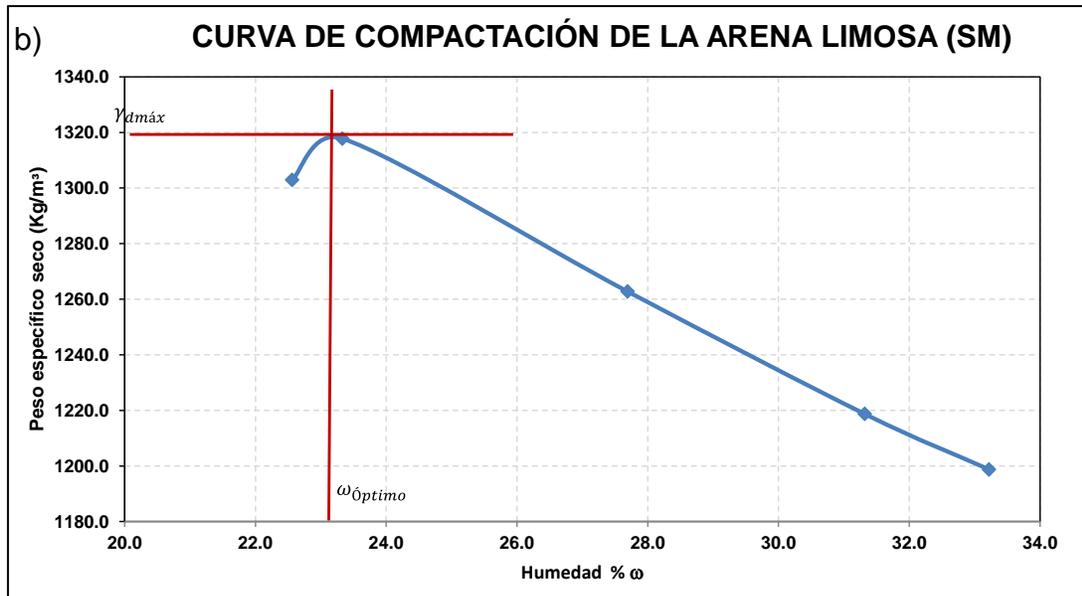
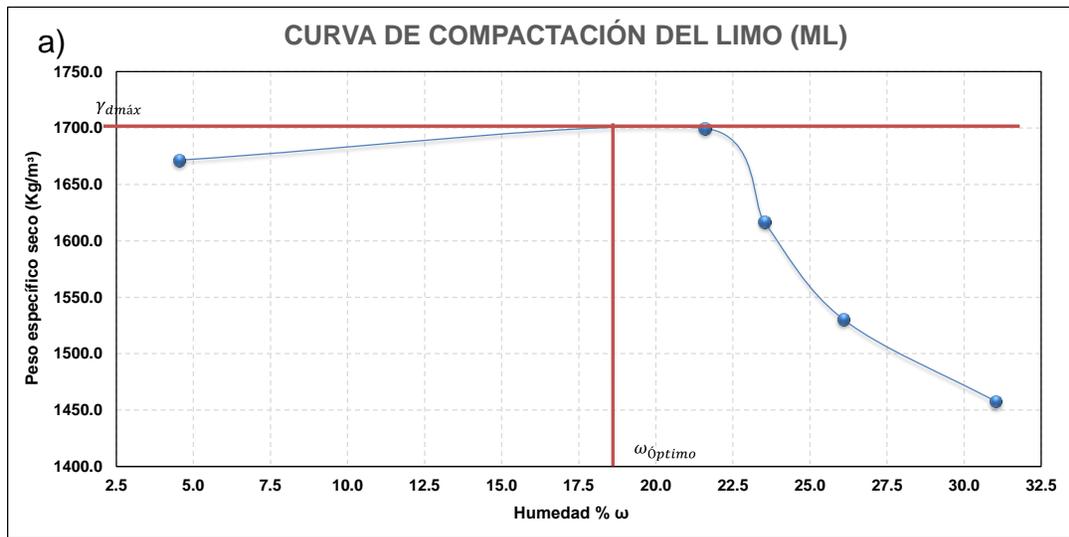
Tabla 6.1 Propiedades índice de los materiales.

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS	PROPIEDADES ÍNDICE					
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)
Limo (ML) de baja compresibilidad	37.6	25.1	12.5	0	11.9	88.1
Arena limosa (SM)	35.2	27.6	7.6	24.7	48.9	26.4
Grava limosa (GM)	42.7	33.7	9.0	56.3	24.6	19.1

Los suelos se sometieron a la prueba de compactación Proctor Modificada, con el propósito de obtener el peso volumétrico seco máximo (γ_{dmax}) y la humedad óptima (ω_{opt}), información fundamental para la formación de las probetas ensayadas. El grafico de la Fig. 6.1 muestra las curvas propias de la granulometría de cada uno de los materiales, mientras que en la tabla 6.2 se presenta un resumen de las humedades óptimas y el peso volumétrico seco máximo de cada material.

Tabla 6.2 Datos obtenidos de la prueba de compactación Proctor Modificada.

COMPACTACIÓN PROTOR MODIFICADA	PESO VOLUMÉTRICO	HUMEDAD ÓPTIMA
	Kg/m ³	(%)
Limo (ML) de baja compresibilidad	1705.0	19.98
Arena limosa (SM)	1391.0	23.10
Grava limosa (GM)	1434.0	29.85



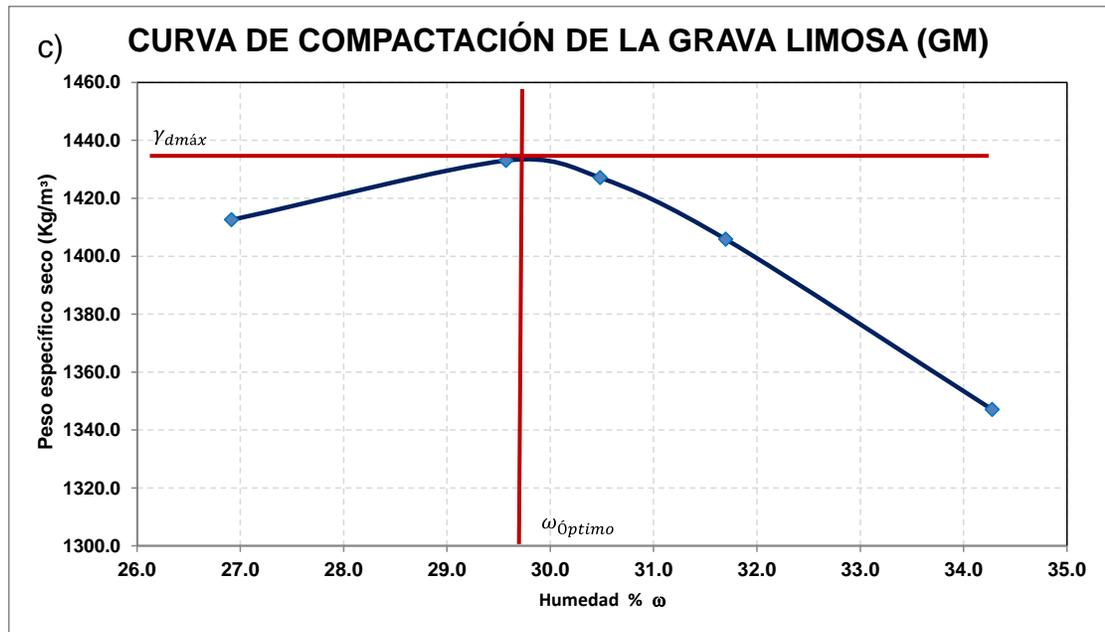


Figura 6.1 Curvas obtenidas de la prueba de compactación Proctor Modificada a) Limo (MH); b) Arena limosa (SM); c) Grava limosa (GM).

6.1. RESULTADOS DE LA FASE I

En las tablas 6.3 a 6.6 se presentan las características físicas de las probetas que se ensayaron en esta fase, es decir, las probetas de limo (ML) con cuatro longitudes diferentes y con variaciones de $\pm 2\%$, $\pm 4\%$ y $\pm 6\%$ del peso volumétrico seco máximo.

Tabla 6.3 Propiedades físicas de probetas de limo (ML) con una longitud de 18 mm.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) DE 18 mm LONGITUD							
Muestra	Humedad %	Diámetro cm	Longitud cm	Área cm ²	Volumen cm ³	Peso	Densidad
						Volumétrico de la muestra (γ_m) kg/m ³	seca (γ_d) kg/m ³
1a	1.09	3.70	1.85	10.75	19.89	1462.7	1446.9
2a	1.06	3.70	1.78	10.75	19.14	1559.4	1543.1
3a	1.05	3.70	1.84	10.75	19.78	1529.7	1513.8
4a	1.02	3.70	1.87	10.75	20.11	1538.3	1522.7
5a	0.74	3.70	1.80	10.75	19.35	1467.8	1457.0
6a	1.21	3.70	1.80	10.75	19.35	1452.8	1435.4
7a	1.16	3.70	1.82	10.75	19.57	1405.9	1389.8

Tabla 6.4 Propiedades físicas de probetas de limo (ML) con una longitud de 37 mm.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) DE 37 mm LONGITUD							
Muestra	Humedad	Diámetro	Longitud	Área	Volumen	Peso Volumétrico de la muestra (γ_m)	Densidad seca (γ_d)
	%	cm	cm	cm²	cm³	kg/m³	kg/m³
1b	1.571	3.70	3.60	10.75	38.71	1474.7	1451.9
2b	1.096	3.70	3.65	10.75	39.25	1474.9	1458.9
3b	0.728	3.70	3.60	10.75	38.71	1519.5	1508.5
4b	1.183	3.70	3.61	10.75	38.82	1549.6	1531.5
5b	0.971	3.70	3.60	10.75	38.71	1432.2	1418.4
6b	1.130	3.70	3.66	10.75	39.35	1383.8	1368.4
7b	0.844	3.70	3.72	10.75	40.00	1369.9	1358.4

Tabla 6.5 Propiedades físicas de probetas de limo (ML) con una longitud de 74 mm.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) DE 74 mm LONGITUD							
Muestra	Humedad	Diametro	Longitud	Área	Volumen	Peso Volumétrico de la muestra (γ_m)	Densidad seca (γ_d)
	%	cm	cm	cm²	cm³	kg/m³	kg/m³
1c	0.83	3.70	7.37	10.75	79.24	1434.0	1422.2
2c	1.16	3.70	7.32	10.75	78.71	1477.8	1460.9
3c	1.15	3.70	7.35	10.75	79.03	1498.8	1481.7
4c	0.93	3.70	7.35	10.75	79.03	1524.6	1510.5
5c	0.99	3.70	7.40	10.75	79.57	1401.5	1387.7
6c	0.38	3.70	7.48	10.75	80.43	1351.8	1346.6
7c	0.53	3.70	7.36	10.75	79.14	1351.5	1344.3

Tabla 6.6 Propiedades físicas de probetas de limo (ML) con una longitud de 95 mm.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) DE 95 mm LONGITUD							
Muestra	Humedad	Diámetro	Longitud	Área	Volumen	Peso Volumétrico de la muestra (γ_m)	Densidad seca (γ_d)
	%	cm	cm	cm²	cm³	kg/m³	kg/m³
1d	1.35	3.70	9.30	10.75	99.99	1361.2	1343.1
2d	1.24	3.70	9.45	10.75	101.61	1386.4	1369.3
3d	1.34	3.70	9.53	10.75	102.47	1403.5	1385.0
4d	1.42	3.70	9.60	10.75	103.22	1443.4	1423.1
5d	1.31	3.70	9.50	10.75	102.15	1480.4	1461.3
6d	1.28	3.70	9.45	10.75	101.61	1510.2	1491.1
7d	1.58	3.70	9.35	10.75	100.53	1532.9	1509.1

En virtud de que es necesario tener un peso volumétrico seco específico y dimensiones precisas, las probetas de la primera fase se realizaron con las condiciones lo más cercanas posibles a lo programado. Sin embargo, hubo variaciones con respecto a la programado en el peso volumétrico de la muestra, sin embargo, se tienen diferencias de este valor que nos permiten tener un rango para observar el comportamiento de la velocidad en distintos pesos volumétricos. Aunado a ello, las probetas de limo (ML) en esta fase tiene una humedad que varía en el rango de 0.3% a 1.5%. Cada una de las probetas se sometió a la prueba de VPU como se observa en la Fig. 6.2, con el método de transmisión directa.

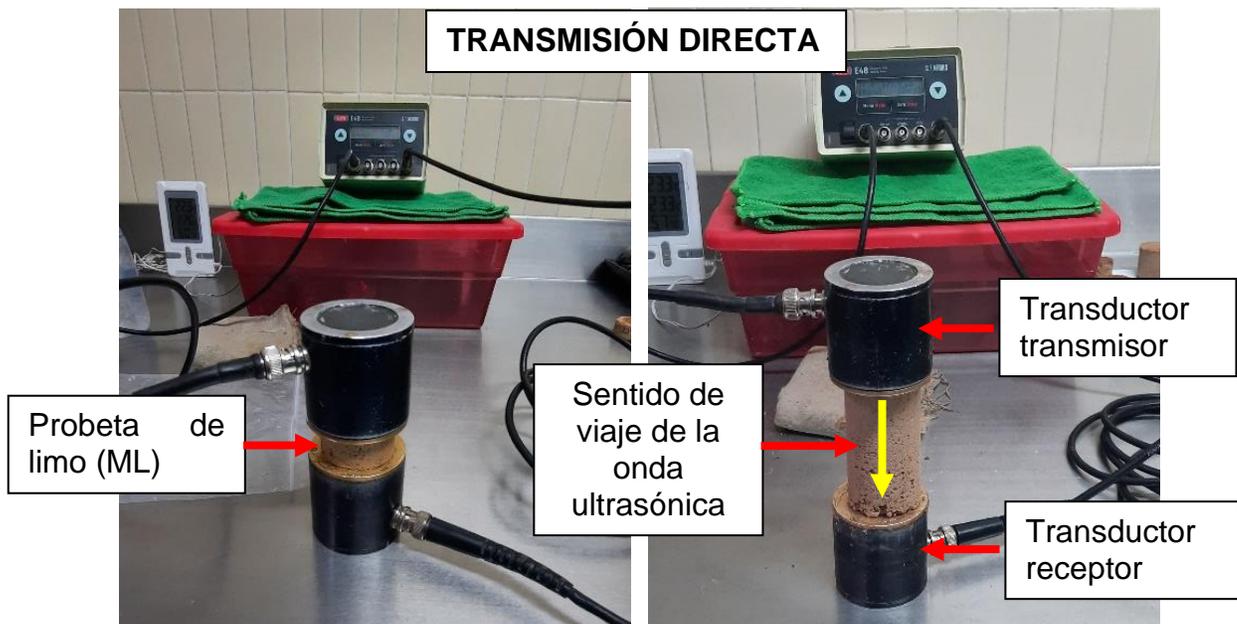


Figura 6.2 Probetas de limo (ML) sometidas a la prueba de VPU.

Como se mencionó anteriormente, la prueba VPU es un método no destructivo porque no altera el estado del material de ninguna manera. Sin embargo, cuando se completó la prueba, al retirar la probeta, el área de la superficie que había estado en contacto con el transductor se adhirió a ella, porque entró en contacto con el gel acoplador, que es un producto viscoso provocando esta adición como se observa en la Fig. 6.3. Por ello, la probeta perdió su superficie plana y no se pudo repetir la prueba con la misma probeta, ya que al tener una superficie irregular en la probeta

se pierde el buen contacto entre el transductor y el material, imposibilitando la toma de lecturas.

Esto se reduce a que la prueba de VPU sí afecta a las probetas de limo (ML) con bajas humedades, porque cambia la forma de la superficie de la probeta con la que interactúa el transductor.



Figura 6.3 Probetas de limo (ML) después de retirar los transductores (pérdida de la superficie plana de la probeta).

Esto se reduce a que la prueba de VPU sí afecta a las probetas de limo (ML) con bajas humedades, porque cambia la forma de la superficie de la probeta con la que interactúa el transductor. A pesar de ello, fue posible obtener las lecturas mínimas requeridas en la prueba.

A continuación, se presentan en las tablas 6.7 a 6.10, la velocidad final que es el promedio de las lecturas tomadas en cada probeta en el transcurso de la prueba.

Con la información obtenida de la velocidad de la onda P y el peso volumétrico de la probeta, fue posible crear los gráficos que se muestran en la Fig. 6.4 a 6.7 y tener una correlación entre estos parámetros.

Tabla 6.7 Datos de las probetas de longitud de 18 mm y las lecturas de las velocidades de arribo de la onda P.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) DE 18 mm LONGITUD								
Muestra	Peso volumétrico de la muestra	Longitud	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3	Promedio tiempo	Velocidad	Velocidad
	kg/m ³	cm	µs	µs	µs	µs	cm/µs	m/s
1a	1462.7	1.85	32.50	32.80	33.20	32.83	0.0563	563.5
2a	1559.4	1.78	26.20	26.40	26.70	26.43	0.0673	673.4
3a	1529.7	1.84	27.60	29.60	28.20	28.47	0.0646	646.4
4a	1538.3	1.87	25.60	26.70	27.10	26.47	0.0707	706.5
5a	1467.8	1.80	27.20	29.30	29.70	28.73	0.0626	626.5
6a	1452.8	1.80	31.00	31.30	32.60	31.63	0.0569	569.0
7a	1405.9	1.82	31.20	32.60	32.90	32.23	0.0565	564.6

Tabla 6.8 Datos de las probetas de longitud de 37 mm y las lecturas de las velocidades de arribo de la onda P.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) DE 37 mm LONGITUD								
Muestra	Peso volumétrico de la muestra	Longitud	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3	Promedio tiempo	Velocidad	Velocidad
	kg/m ³	cm	µs	µs	µs	µs	cm/µs	m/s
1b	1474.7	3.60	49.20	51.60	52.20	51.00	0.0706	705.9
2b	1474.9	3.65	55.40	56.20	56.90	56.17	0.0650	649.9
3b	1519.5	3.60	47.30	49.70	49.50	48.83	0.0737	737.2
4b	1549.6	3.61	46.30	49.20	50.80	48.77	0.0740	740.3
5b	1432.2	3.60	53.20	54.10	56.20	54.50	0.0661	660.6
6b	1383.8	3.66	57.20	58.60	60.30	58.70	0.0624	623.5
7b	1369.9	3.72	59.70	61.20	62.70	61.20	0.0608	607.8

Tabla 6.9 Datos de las probetas de longitud de 74 mm y las lecturas de las velocidades de arribo de la onda P.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) DE 74 mm LONGITUD								
Muestra	Peso volumétrico de la muestra	Longitud	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3	Promedio tiempo	Velocidad	Velocidad
	kg/m ³	cm	µs	µs	µs	µs	cm/µs	m/s
1c	1434.0	7.37	104.40	105.70	105.30	105.13	0.0701	701.0
2c	1477.8	7.32	99.10	101.80	102.90	101.27	0.0723	722.8
3c	1498.8	7.35	103.70	104.00	104.70	104.13	0.0706	705.8
4c	1524.6	7.35	95.20	96.90	97.90	96.67	0.0760	760.3
5c	1401.5	7.40	115.10	117.20	117.70	116.67	0.0634	634.3
6c	1351.8	7.48	125.20	126.30	126.70	126.07	0.0593	593.3
7c	1351.5	7.36	118.70	120.20	120.60	119.83	0.0614	614.2

Tabla 6.10 Datos de las probetas de longitud de 95 mm y las lecturas de las velocidades de arriba de la onda P.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) DE 95 mm LONGITUD								
Muestra	Peso volumétrico de la muestra kg/m ³	Longitud cm	Tiempo 1 μs	Tiempo 2 μs	Tiempo 3 μs	Promedio tiempo μs	Velocidad cm/μs	Velocidad m/s
1d	1361.2	9.30	158.60	155.30	155.60	156.50	0.0594	594.2
2d	1386.4	9.45	150.00	149.20	148.80	149.33	0.0633	632.8
3d	1403.5	9.53	147.70	147.20	146.70	147.20	0.0647	647.4
4d	1443.4	9.60	136.90	136.70	137.60	137.07	0.0700	700.4
5d	1480.4	9.50	131.30	130.60	130.60	130.83	0.0726	726.1
6d	1510.2	9.45	125.20	125.10	124.90	125.07	0.0756	755.6
7d	1532.9	9.35	122.70	122.60	122.50	122.60	0.0763	762.6

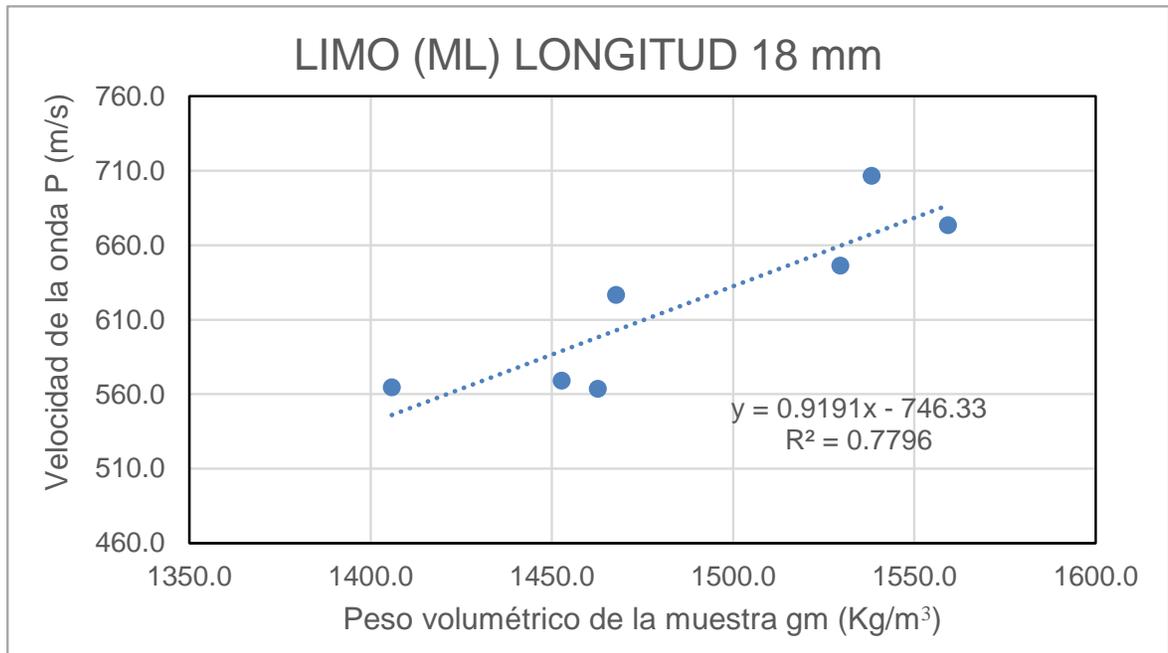


Figura 6.4 Gráfico de la relación entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P para probetas de limo (ML) de 18 mm de longitud.

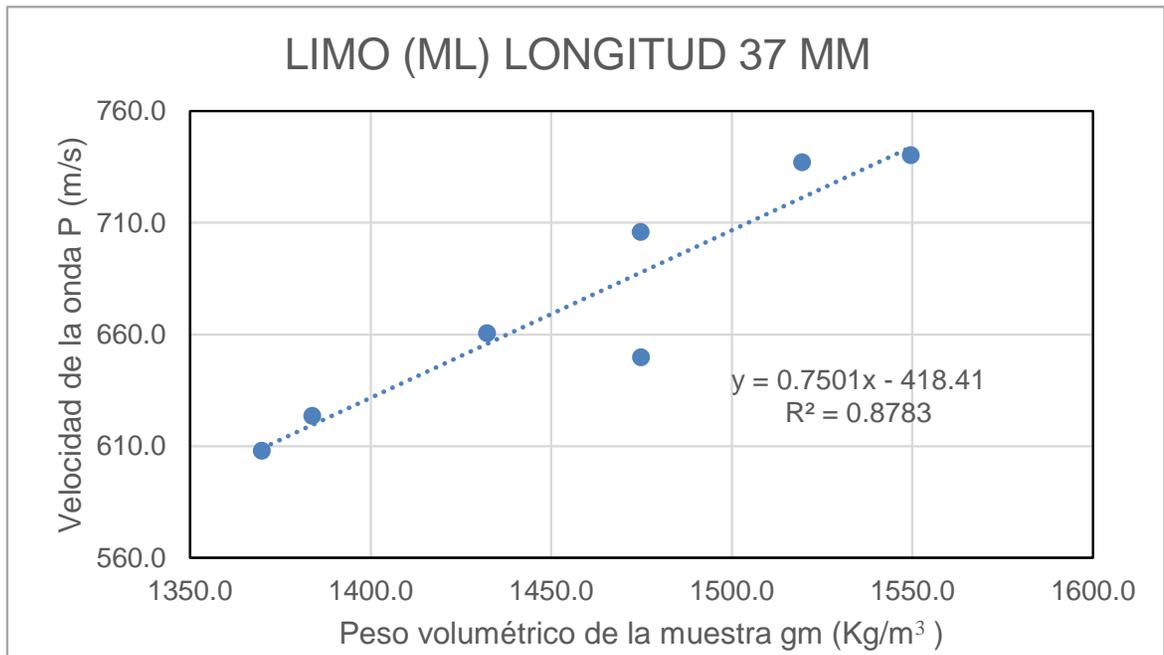


Figura 6.5 Gráfico de la relación entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P para probetas de limo (ML) de 37 mm de longitud.

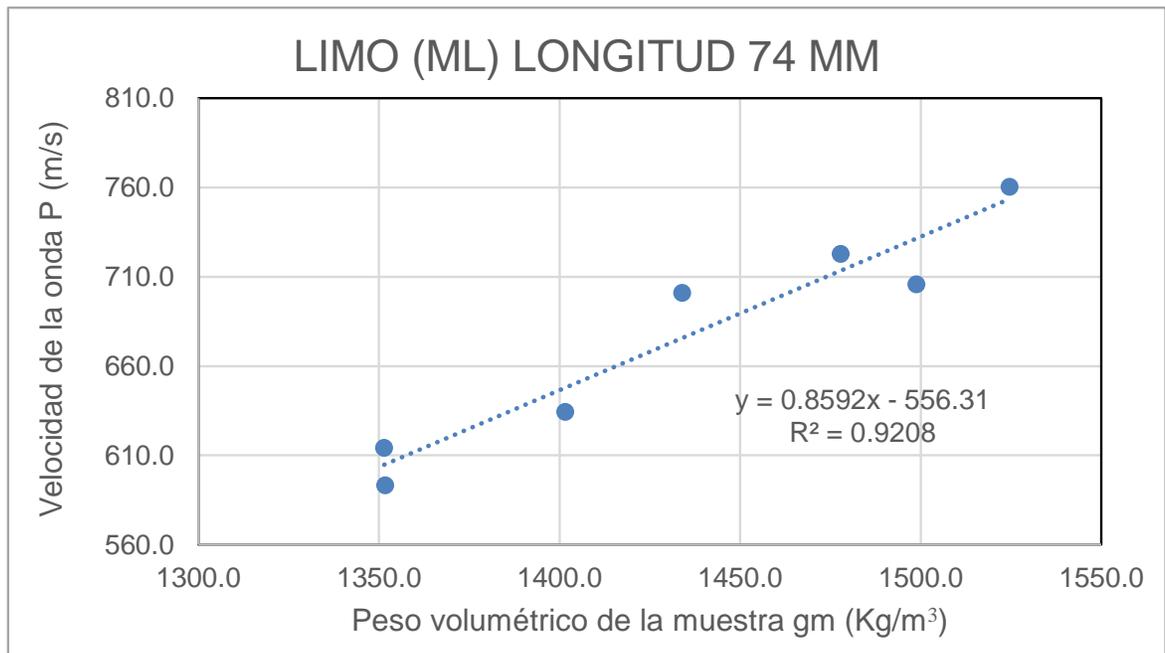


Figura 6.6 Gráfico de la relación entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P para probetas de limo (ML) de 74 mm de longitud.

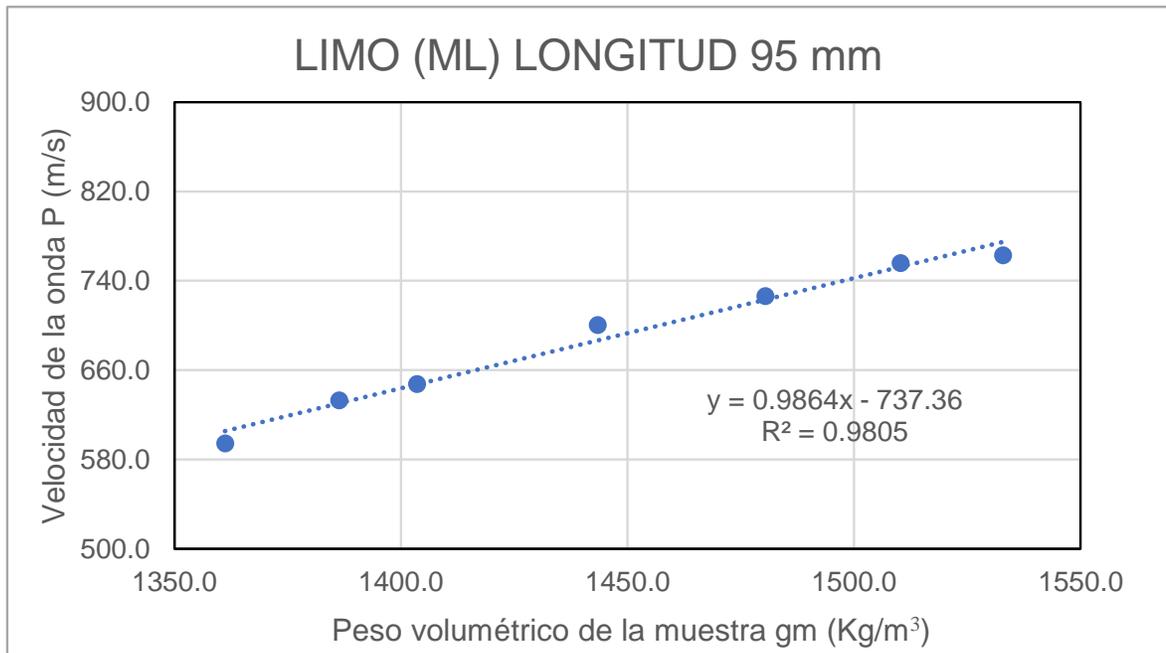


Figura 6.7 Gráfico de la relación entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P para probetas de limo (ML) de 95 mm de longitud.

En todos los gráficos de la Fig. 6.4 a 6.7 se muestra una correlación lineal entre la velocidad de la onda P correspondiente a cada peso volumétrico de cada probeta de limo (ML).

Matemáticamente, se realizó un análisis con las líneas de tendencias que definen el coeficiente de determinación (R^2). El coeficiente de determinación es una medida que indica el grado de ajuste entre las variables.

Además, con las ecuaciones derivadas de cada línea de tendencia, es posible extrapolar las variables a valores tanto de peso volumétrico como de velocidad que no se obtuvieron directamente durante el experimento.

En el caso del coeficiente de determinación se tienen valores de $R^2 = 0.77$ para una longitud de 18 mm de la probeta, $R^2 = 0.87$ para una longitud de 37 mm de la probeta, $R^2 = 0.92$ para una longitud de 74 mm de la probeta y $R^2 = 0.98$ para una longitud de 95 mm de la probeta, indicando que existe un mayor grado de ajuste en los resultados obtenidos de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico en las probetas de 95 mm.

Posteriormente, se eligieron tres pesos volumétricos (1477.9 kg/m³, 1421.1 kg/m³ y 1366.4 kg/m³) para obtener la velocidad de la onda P utilizando las cuatro ecuaciones proporcionadas por la correlación; las velocidades resultantes están contenidas en la Tabla 6.11. Posteriormente, se calculó el porcentaje de variación entre los datos obtenidos en cada ecuación (ver la tabla 6.12). Con estos datos se puede observar que:

- Las velocidades menores se obtienen con la ecuación derivada de la correlación para las probetas de 18 mm de longitud.
- Las velocidades mayores se obtienen con la ecuación derivada de la correlación para las probetas de 95 mm de longitud.
- El porcentaje de variación más alto se tiene entre los resultados obtenidos de las ecuaciones correspondientes a las probetas de 18 mm y 95 mm con un valor de porcentaje de variación de 21.23% a 17.72%.
- El porcentaje de variación menor se tiene entre los resultados obtenidos de las ecuaciones correspondientes a las probetas de 74 mm y 95 mm con un valor de 1.19% a 0.04%.

Tabla 6.11 Valores de la velocidad de la onda P obtenidos a partir de las ecuaciones de correlación.

LONGITUD mm	ECUACIONES DE CORRELACIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R2) %	PESO VOLUMÉTRICO (valor de x) kg/m ³		
			1477.9	1421.1	1366.4
Velocidad de onda P m/s					
18	0.9191x-746.33	0.77	612.02	559.78	509.54
37	0.7501x-418.41	0.87	690.17	647.53	606.54
74	0.8592x-556.31	0.92	713.51	664.67	617.71
95	0.9864x-737.36	0.98	720.45	664.38	610.47

Tabla 6.12 Variaciones en porcentaje entre las velocidades.

LONGITUD mm	ECUACIONES DE CORRELACIÓN	PESO VOLUMÉTRICO (valor de x)		kg/m ³
		1477.9	1421.1	1366.4
		Velocidad de onda P m/s		
18	0.9191x-746.33	612.02	559.78	509.54
95	0.9864x-737.36	720.45	664.38	610.47
	% DE VARIACIÓN	17.72%	18.74%	21.23%

LONGITUD mm	ECUACIONES DE CORRELACIÓN	PESO VOLUMÉTRICO (valor de x)		kg/m ³
		1477.9	1421.1	1366.4
		Velocidad de onda P m/s		
37	0.7501x-418.41	690.17	647.53	606.54
95	0.9864x-737.36	720.45	664.38	610.47
	% DE VARIACIÓN	4.39%	2.65%	1.84%

Para apreciar de manera gráfica la variación entre las velocidades obtenidas en la prueba y su variación entre ellas se muestra la Fig. 6.8, con todos los resultados de esta fase.

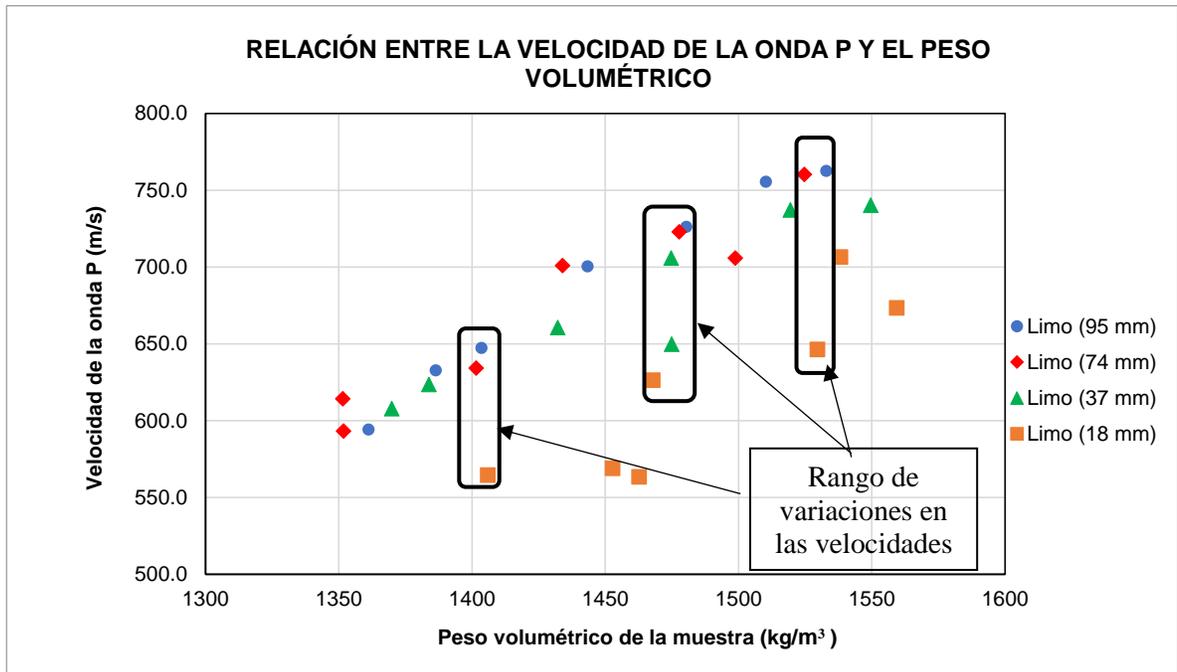


Figura 6.8 Comportamiento de la velocidad de la onda P de cada una de las probetas con las cuatro longitudes.

En la tabla 6.12 y en la Fig. 6.8 se presenta la distribución de las velocidades con las variaciones en el peso volumétrico de las probetas, en ellas se observa que hay un ajuste de 0.87% a 0.98% en la línea de tendencia para las probetas de limo (ML) con un diámetro de 37 mm y longitudes de 37 mm, 74 mm y 95 mm respectivamente; además, hay menos del 5% de diferencia en el valor de las velocidades obtenidas con cada una de sus ecuaciones entre ellas (ver tabla 6.11).

Por otro lado, se puede ver que el coeficiente de determinación (ajuste) de los resultados de las probetas de 18 mm es de 0.77%, que es inferior al de las demás, y que la proporción de variación de las velocidades obtenida por la ecuación es superior a la de las demás estando por encima del 17%, lo que indica una mayor incertidumbre de los datos que se obtengan bajo esta ecuación (ver la Fig. 6.8).

No obstante, todas las probetas limo (ML) tienen un ajuste razonable, por lo que se concluye que las medidas de 18 mm, 37 mm, 74 mm y 95 mm de longitud con un diámetro de 37 mm para muestras de limo (ML) con humedades no mayores a 1.5% son fiables para la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, teniendo en cuenta sus comportamientos aquí mencionados.

Con esta información se puede decir que, las dimensiones de las probetas del limo (ML) con humedades por debajo del 1.5%, tienen un efecto en la velocidad de la onda P.

6.2. RESULTADOS DE LA FASE II

Debido a que, en la fase anterior (fase I de la experimentación) se observó y analizó el impacto que causan las longitudes en la velocidad de la onda P, se eligieron para esta fase (Fase II) las longitudes de 74 mm y 95 mm que mostraron un mejor ajuste en la línea de tendencia.

Además, para la Fase II de experimentación de esta investigación se trabajó con el material clasificado de acuerdo a las S.U.C.S como arena limosa (SM) y grava limosa (GM). En la tabla 6.13 y 6.14 se muestran las propiedades físicas de las probetas se utilizaron en esta etapa.

Tabla 6.13 Propiedades físicas de probetas de arena limosa (SM) con una longitud de 74 mm.

MUESTRAS HÚMEDAS DE ARENA LIMOSA (SM) DE 74 mm DE LONGITUD							
Muestra	Humedad	Diámetro	Longitud	Área	Volumen	Peso Volumétrico de la muestra (γ_m)	Densidad seca (γ_d)
	%	cm	cm	cm ²	cm ³	kg/m ³	kg/m ³
A	23.415	3.70	7.33	10.75	78.80	1251.3	1013.9
B	23.188	3.70	7.15	10.75	76.91	1282.1	1040.7
C	23.810	3.70	7.24	10.75	77.87	1304.7	1053.8
D	23.793	3.70	7.18	10.75	77.25	1319.1	1065.6
E	23.778	3.70	7.19	10.75	77.34	1356.3	1095.7
F	25.127	3.70	7.28	10.75	78.30	1340.9	1071.6
G	25.126	3.70	7.29	10.75	78.43	1379.6	1102.6
H	24.552	3.70	7.15	10.75	76.85	1405.3	1128.3
I	25.536	3.70	7.25	10.75	77.95	1426.6	1136.4
J	25.059	3.70	7.18	10.75	77.15	1442.6	1153.5

Tabla 6.14 Propiedades físicas de probetas de arena limosa (SM) con una longitud de 95 mm.

MUESTRAS HÚMEDAS DE ARENA LIMOSA (SM) DE 95 mm DE LONGITUD							
Muestra	Humedad	Diámetro	Longitud	Área	Volumen	Peso Volumétrico de la muestra (γ_m)	Densidad seca (γ_d)
	(%)	(cm)	(cm)	cm ²	cm ³	kg/m ³	kg/m ³
M	24.437	3.70	9.16	10.75	98.54	1272.6	1022.7
N	25.126	3.70	9.28	10.75	99.73	1256.4	1004.1
O	26.269	3.70	9.32	10.75	100.16	1291.0	1022.4
P	25.484	3.70	9.25	10.75	99.41	1302.7	1038.2
Q	24.390	3.70	9.39	10.75	101.01	1321.7	1062.5
R	25.799	3.70	9.44	10.75	101.51	1312.2	1043.1
S	22.768	3.70	9.40	10.75	101.08	1359.4	1107.3
T	21.670	3.70	9.43	10.75	101.36	1354.6	1113.4
U	24.148	3.70	9.41	10.75	101.21	1394.1	1123.0
V	23.831	3.70	9.24	10.75	99.32	1420.7	1147.3

Sin embargo, se redujo la experimentación sólo a las probetas de la arena limosa, debido a que, para las probetas de grava limosa no fue posible hacer mediciones por la inestabilidad desde su fabricación y/o medición en la prueba de VPU, porque al colocar las probetas entre los transductores y aplicar cierta presión para realizar la prueba VPU, las probetas colapsaban como se muestra en la Fig. 6.9. Dicho

suceso también se produjo en algunas probetas de arena limosa, que en su mayoría eran probetas de 95 mm de longitud con los pesos volumétricos más bajos.

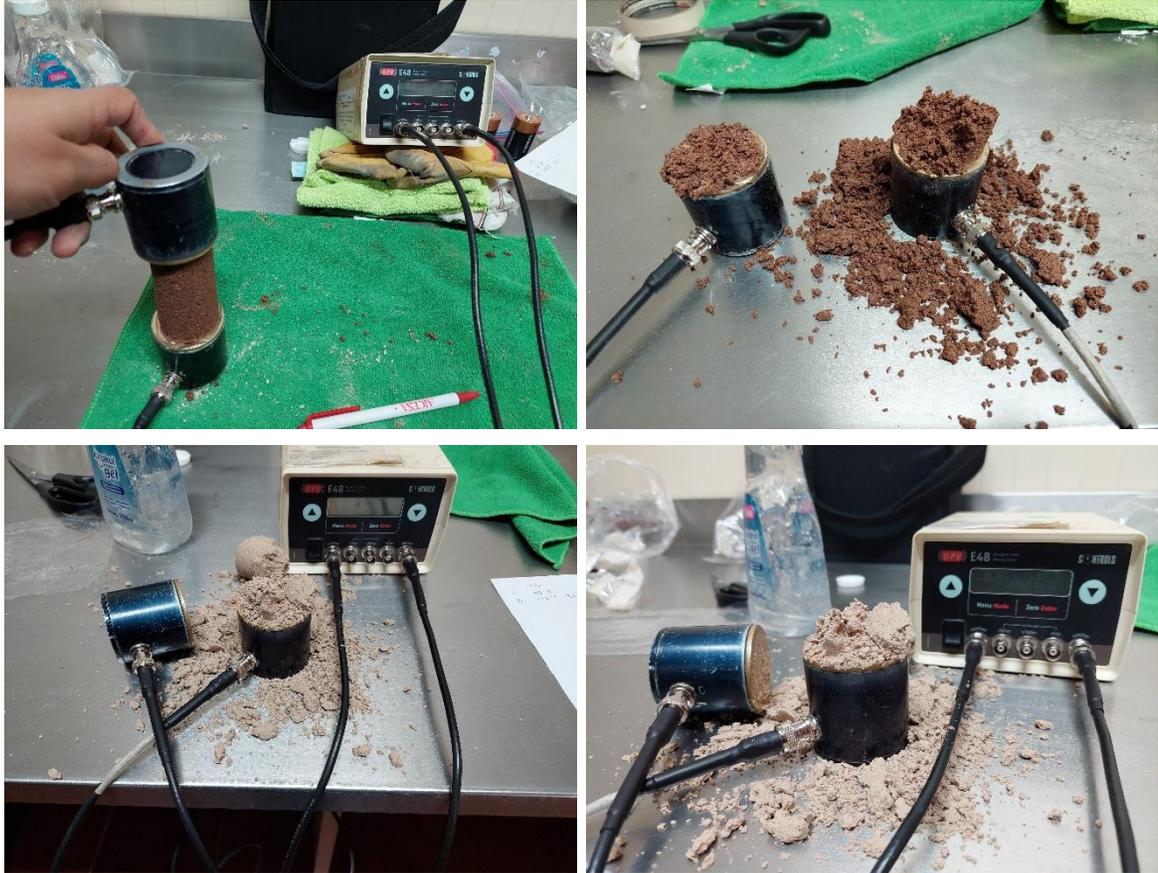


Figura 6.9 Desintegración de las probetas de grava limosa y de arena limosa.

En la tabla 6.15 y 6.16 se muestran las lecturas de las velocidades de la onda P que se obtuvieron en las mediciones en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico para las probetas de arena limosa (SM), con una humedad en el rango de 21.7% a 26.2%, que corresponde a un grado de saturación de 41.0% a 55.4%.

También, en la Fig. 6.10 y 6.11, se presentan los gráficos que muestran que el comportamiento de la velocidad de onda P no es lineal para las mediciones realizadas en probetas de arena limosa (SM) con una longitud de 74 mm, sino que se presenta un comportamiento cuadrático.

Por otra parte, cuando la prueba se realizó en las probetas de arena limosa de 95 mm de longitud, se observó que, a diferencia de la muestra de limo (ML) con la misma longitud, no se obtuvieron lecturas en las probetas con menor peso volumétrico (densidad) y algunas probetas se desintegraron al aplicar una ligera presión entre la probeta y el transductor (ver Fig. 7.9). Esto sugiere que la humedad en la arena limosa (SM) hace que la energía de la onda P se disipe, haciendo imposible que el arribo de la onda alcance al transductor receptor.

En los gráficos correspondientes a las tablas 6.15 y 6.16 (Fig. 6.10 y 6.11 respectivamente) se puede observar que la velocidad de onda P para suelo limoso con contenido de humedad mayor al 23% oscila entre 154.5 m/s y 179.1 m/s, valores inferiores a los obtenidos para suelo limoso con contenido de humedad menor al 2%, que van desde los 593.3 m/s hasta los 762.2 m/s en probetas de la misma longitud (ver tabla 6.7 y 6.10). Esto indica una disminución en la velocidad de las ondas como resultado de un aumento en el contenido de humedad.

Este comportamiento de tener menores velocidades para pesos volumétricos menores, se debe a que la teoría indica que la velocidad de las ondas mecánicas depende de las propiedades del medio en el que viajen, mientras más alta sea la densidad (peso volumétrico) mayor es la velocidad (Telford et al., 1990; Tarbuck et al., 2005; Ceccotti et al., 2007; French, 2012; Pérez y Salvatierra, 2014, Grigioni et al., 2017; Roller y Blum, 2020), en adición que, para este caso, en primera instancia, también se puede observar que el incremento de la humedad provoca la disminución en la velocidad de la onda P e incluso su desaparición.

Tabla 6.15 Datos de las probetas de longitud de 74 mm de arena limosa (SM) y las lecturas de las velocidades de arriba de la onda P.

PROBETAS HÚMEDAS DE LIMO (ML) LONGITUD 74 mm								
Muestra	Peso volumétrico de la muestra kg/m ³	Longitud cm	Tiempo 1 μs	Tiempo 2 μs	Tiempo 3 μs	Promedio tiempo μs	Velocidad cm/μs	Velocidad m/s
A	1251.3	7.33	-	-	-	-	-	-
B	1282.1	7.15	420.90	415.50	-	418.20	0.0171	171.0
C	1304.7	7.24	451.80	-	-	451.80	0.0160	160.3
D	1319.1	7.18	458.20	479.50	435.00	457.57	0.0157	157.0
E	1356.3	7.19	483.10	458.30	455.60	465.67	0.0154	154.5
F	1340.9	7.28	-	-	-	-	-	-
G	1379.6	7.29	467.20	481.10	450.70	466.33	0.0156	156.4
H	1405.3	7.15	446.70	450.80	450.70	449.40	0.0159	159.0
I	1426.6	7.25	441.30	441.70	441.70	441.57	0.0164	164.2
J	1442.6	7.18	432.10	428.70	424.20	428.33	0.0168	167.5

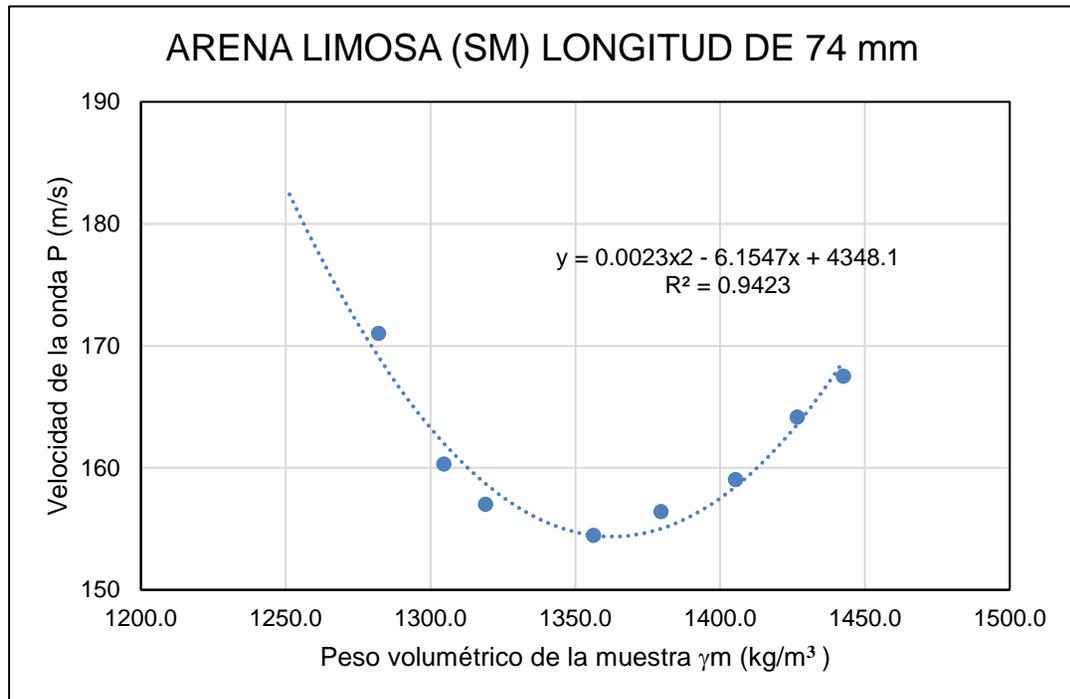


Figura 6.10 Gráfico de la relación entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P para probetas de arena limosa (SM) de 74 mm de longitud.

Tabla 6.16 Datos de las probetas de longitud de 95 mm de arena limosa (SM) y las lecturas de las velocidades de arriba de la onda P.

PROBETAS HÚMEDAS DE ARENA LIMOSA (SM) LONGITUD 95 mm								
Muestra	Peso volumétrico de la muestra kg/m ³	Longitud cm	Tiempo 1 μs	Tiempo 2 μs	Tiempo 3 μs	Promedio tiempo μs	Velocidad cm/μs	Velocidad m/s
M	1272.6	9.16	-	-	-	-	-	-
N	1256.4	9.28	-	-	-	-	-	-
O	1291.0	9.32	-	-	-	-	-	-
P	1302.7	9.25	-	-	-	-	-	-
Q	1321.7	9.39	-	-	-	-	-	-
R	1312.2	9.44	-	-	-	-	-	-
S	1359.4	9.40	564.9	-	-	564.90	0.0166	166.4
T	1354.6	9.43	558.3	-	-	558.30	0.0169	168.8
U	1394.1	9.41	529.0	-	-	529.00	0.0178	177.9
V	1420.7	9.24	515.7	-	-	515.70	0.0179	179.1

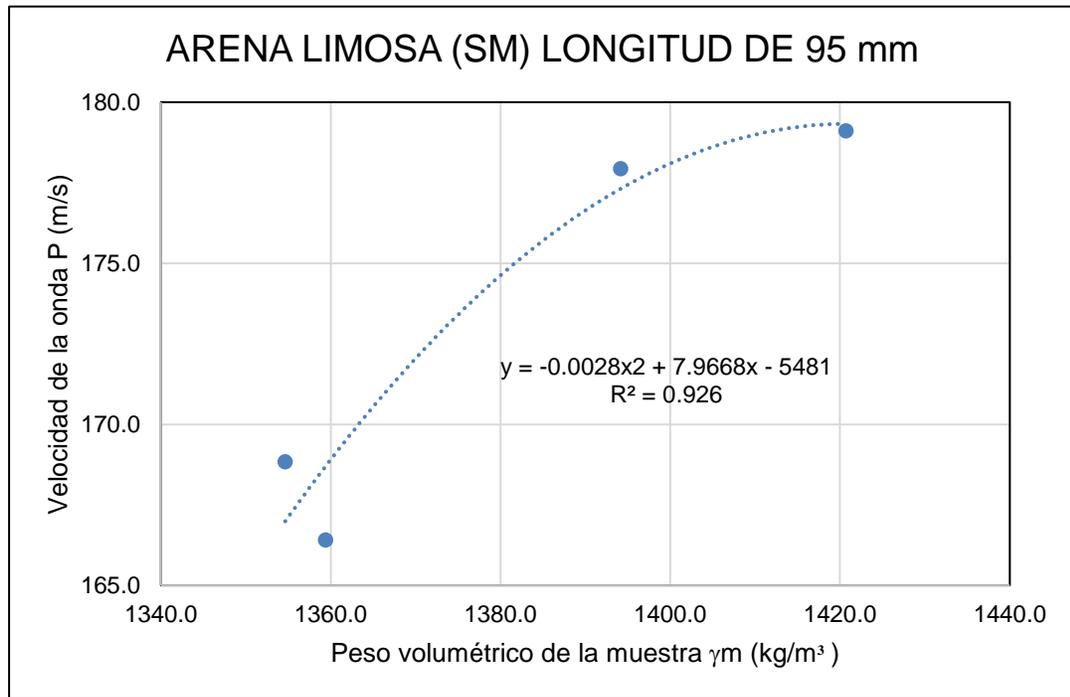


Figura 6.11 Gráfico de la relación entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P para probetas de arena limosa (SM) de 95 mm de longitud.

Teniendo en cuenta los datos mencionados anteriormente, se puede decir que la humedad afecta la velocidad de la onda P, haciendo que la velocidad de la onda disminuya a medida que aumenta la humedad en el suelo areno limoso.

Ya que no se obtuvieron todas las lecturas de las probetas de arena limosa (SM) con una longitud de 95 mm, se realizó el análisis de la velocidad de la onda P sólo en las probetas de arena limosa con una longitud de 74 mm. Debido que, a través de este gráfico, se puede observar más ampliamente y con mayor claridad cómo se comportó la velocidad de la onda acústica cuando se varía el peso volumétrico de una arena limosa con humedades de 23.1% a 25.0%.

En primer lugar, gracias a la línea de tendencia se puede apreciar que las lecturas muestran una tendencia cuadrática, con un coeficiente de determinación $R^2=0.94$, catalogado como un ajuste muy bueno, así como se puede observar que la distribución de los datos tomó la forma de una parábola invertida, siendo el punto de inflexión un valor muy cercano al peso volumétrico seco máximo de la arena limosa

En la Fig. 6.12, por un lado, se muestra que antes del punto de inflexión (puntos encerrados en el círculo color rojo), los pesos volumétricos son menores, por lo que se esperarían velocidades menores en comparación con las probetas de pesos volumétricos mayores. Sin embargo, también es importante observar que para estas probetas el grado de saturación es menor, por lo que, al tener un menor grado de saturación, existe una menor cantidad de poros llenos por agua y, por lo tanto, de acuerdo a los trabajos de Slavova et al., Cheng y Leong 2013, así como Weidinger et al., presentado en el año 2010, 2013 y 2009 respectivamente, las velocidades disminuyen al incrementar el grado de saturación. Por lo que, dicho comportamiento se adecua a lo documentado.

Mientras que, por otra parte, después del punto de inflexión (puntos encerrados en el círculo verde) se observa que la velocidad aumenta al aumentar el peso volumétrico de la muestra; fenómeno que se observó en la primera fase de la experimentación y que ha sido presentado también por Kurtulus et al., 2012, Chawre, 2018.

Los cambios en las variables usadas en esta investigación en conjunto no han sido reportados con antelación; por lo que, en resumen, en la Fig. 6.12 se muestran

ambos comportamientos, (la disminución de la velocidad por incremento de grado de saturación y el incremento de la velocidad por incremento en el peso volumétrico), en probetas de 74 mm de longitud y 37 mm de diámetro un suelo arena limoso con humedad óptima con un punto de inflexión (valor cercano al peso volumétrico seco máximo) que permite que ambos sucesos se desarrollen en esta corrida.

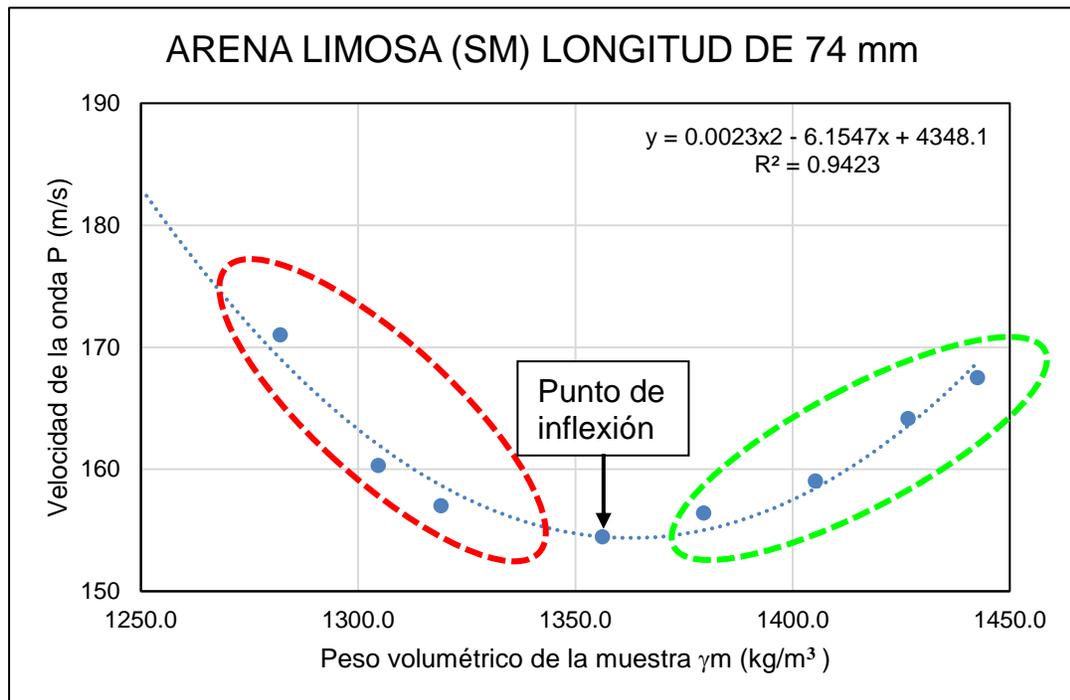


Figura 6.12 Gráfica del comportamiento de la velocidad ultrasónica P, para un suelo arena limoso (SM) con humedad óptima y variaciones en el peso volumétrico.

A continuación, en la Fig. 6.13 se exponen dos gráficas de Slavova et al., 2010, en donde existe un cambio en la humedad manteniendo el mismo peso volumétrico seco del suelo y, por ende, el grado de saturación incrementa al aumentar la humedad; así como la de Kurtulus et al., 2012, que presenta cambios en los pesos volumétricos de núcleos de roca con la misma humedad. En ambas gráficas se observan los comportamientos obtenidos en esta fase y en conjunto se observa el comportamiento de la parábola invertida similar al obtenido del suelo arena limoso con humedad óptima.

Por lo tanto, en conclusión, para esta fase, se tiene que la humedad es un factor que provoca una disminución en la velocidad de onda P para una arena limosa en comparación con un limo (ML) con humedad cercana a cero, y que el comportamiento para la arena limosa con una humedad óptima para muestras cilíndricas de 74 mm de longitud tiende a un comportamiento de parábola invertida con un punto de inflexión (valor cercano al peso volumétrico seco máximo).

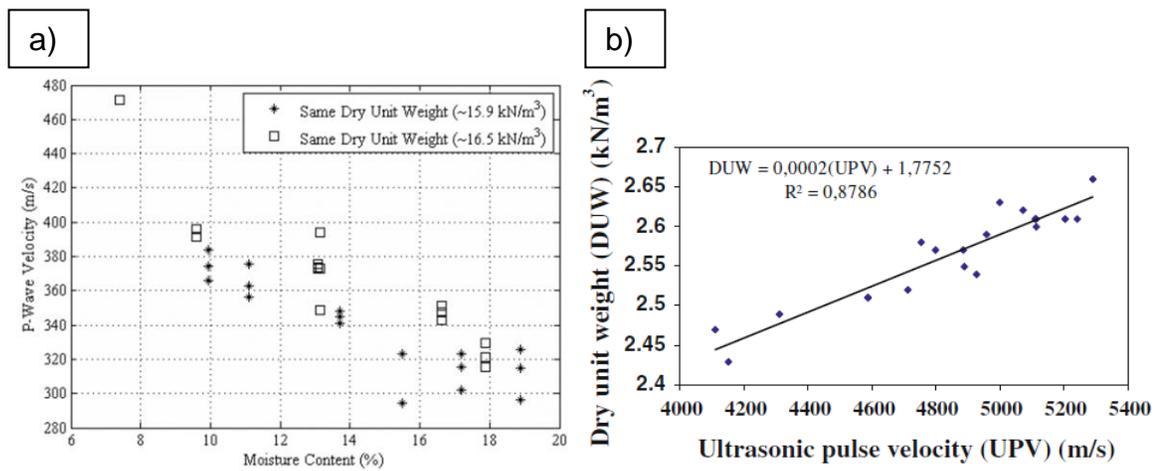


Figura 6.13 a) Gráfica presentada por Slavova et al., 2010; b) Gráfica presentada por Kurtulus et al., 2012.

6.3. RESULTADOS DE LA FASE III

La Fase III de la experimentación de esta investigación es resultado de la necesidad de utilizar un material rígido que permita retirar las probetas de grava limosa del molde de remoldeo, para evitar la desintegración del cilindro y realizar la prueba de velocidad de pulso ultrasónico.

A continuación, en las tablas 6.17 y 6.18 se presentan las propiedades físicas de las probetas de grava limosa (GM).

Tabla 6.17 Propiedades físicas de probetas de grava limosa (GM) con una longitud de 74 mm.

MUESTRAS HÚMEDAS GRAVALIMOSA (GM) LONGITUD 74 mm							
Muestra	Humedad	Diámetro	Longitud	Área	Volumen	Peso Volumétrico de la muestra (γ_m)	Densidad seca (γ_d)
	%	cm	cm	cm²	cm³	kg/m³	kg/m³
I	31.90	3.50	7.22	9.62	69.42	1420.4	1076.9
II	32.34	3.50	7.37	9.62	70.86	1391.5	1051.5
III	32.18	3.50	7.33	9.62	70.52	1440.7	1089.9
IV	33.39	3.50	7.62	9.62	73.31	1389.9	1042.0
V	33.95	3.50	7.48	9.62	71.97	1457.6	1088.2
VI	34.92	3.50	7.52	9.62	72.35	1451.3	1075.6
VII	34.29	3.50	7.28	9.62	70.04	1544.8	1150.4
VIII	34.37	3.50	7.23	9.62	69.51	1553.7	1156.3

Tabla 6.18 Propiedades físicas de probetas de grava limosa (GM) con una longitud de 95 mm.

MUESTRAS HÚMEDAS GRAVALIMOSA (GM) LONGITUD 95 mm							
Muestra	Humedad	Diámetro	Longitud	Área	Volumen	Peso Volumétrico de la muestra (γ_m)	Densidad seca (γ_d)
	%	cm	cm	cm²	cm³	kg/m³	kg/m³
X	32.27	3.50	9.40	9.62	90.46	1090.0	824.1
XI	31.33	3.50	9.37	9.62	90.13	1094.0	833.0
XII	31.10	3.50	9.45	9.62	90.91	1117.6	852.5
XIII	32.50	3.50	9.42	9.62	90.63	1124.4	848.6
XIV	33.47	3.50	9.45	9.62	90.95	1153.4	864.2
XV	34.11	3.50	9.39	9.62	90.31	1162.6	866.9
XVI	33.38	3.50	9.43	9.62	90.68	1193.2	894.6
XVII	33.12	3.50	9.43	9.62	90.68	1191.0	894.7

Para evitar que el cilindro de grava colapsara durante la fabricación de las probetas de grava limosa, se puso una hoja de acetato al interior del molde de remoldeo. Sin quitar la hoja de acetato, y teniendo en cuenta que se encontrara al nivel de la superficie de la probeta, se colocó la probeta entre los transductores y se aplicó una ligera presión para realizar la prueba y obtener lecturas.

Durante la prueba, la probeta no perdió su forma, sin embargo, no se pudo tener todas las lecturas, para las probetas con longitud de 74 mm, debido al

amortiguamiento de la señal por la humedad y el tamaño de las partículas y, en casi todas las mediciones, los resultados mostrados en el monitor fueron inconsistentes y la señal se perdía constantemente.

En el caso de las probetas de grava limosa con 95 mm de longitud no se obtuvo ninguna lectura. Esto sugiere que usar esta longitud de probetas para un suelo del tipo grava limosa con humedad óptima no sería factible la prueba de VPU, ya que la disipación de energía de la onda es bastante alta y la señal se pierde en el medio.

Los resultados del ensayo de la grava limosa para probetas de 74 mm de longitud se muestran en la tabla 6.19; mientras que, en la Fig. 6.14 se presenta el gráfico que correlaciona las variables de velocidad de la onda P y el peso volumétrico de las probetas.

Tabla 6.19 Datos de las probetas de longitud de 74 mm de grava limosa y gráfico entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P.

PROBETAS HÚMEDAS DE GRAVA LIMOSA (GM) LONGITUD 74 mm								
Muestra	Peso volumétrico de la muestra kg/m ³	Longitud cm	Tiempo 1 μs	Tiempo 2 μs	Tiempo 3 μs	Promedio tiempo μs	Velocidad cm/μs	Velocidad m/s
I	1420.4	7.22	113.30	114.50	114.70	114.17	0.0632	632.0
II	1391.5	7.37	110.70	132.80	133.20	125.57	0.0587	586.5
III	1440.7	7.33	-	-	-	-	-	-
IV	1389.9	7.62	-	-	-	-	-	-
V	1457.6	7.48	161.30	160.90	161.60	161.27	0.0464	463.8
VI	1451.3	7.52	-	-	-	-	-	-
VII	1544.8	7.28	180.70	181.10	160.70	174.17	0.0418	418.0
VIII	1553.7	7.23	255.90	255.10	254.40	255.13	0.0283	283.2

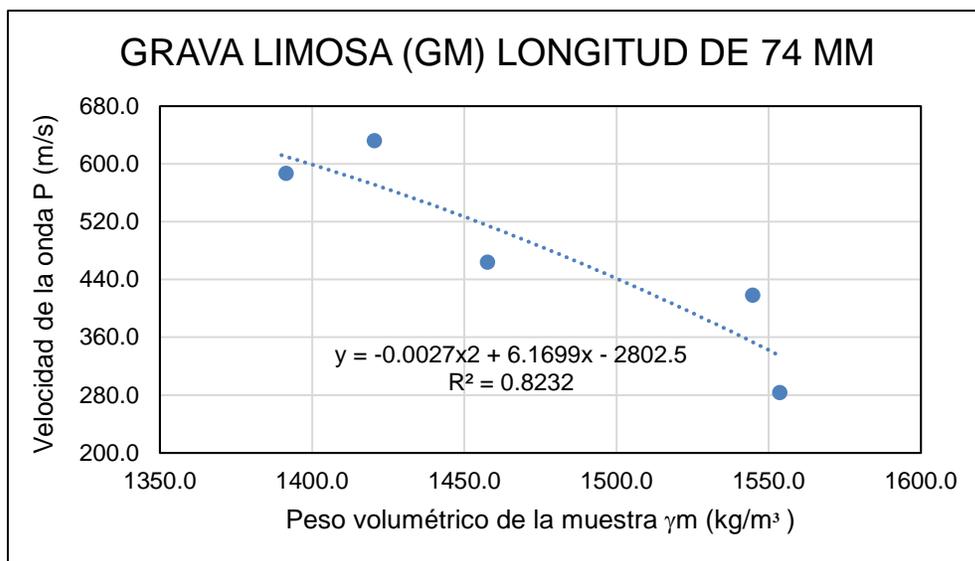


Figura 6.14 Gráfico de la relación entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P para probetas de grava limosa (GM) de 74 mm de longitud

La tabla 6.19 y el gráfico de la Fig. 6.14 muestran que la línea de tendencia se ajusta con un $R^2 = 0.82$, con velocidades de 283.2 m/s a 632.0 m/s.

Sin embargo, con la finalidad de determinar si los resultados son confiables y asegurar que la hoja de acetato no tenga impacto en los datos obtenidos y que las inconsistencias en las lecturas no sean causadas por esta variable, se realizó nuevamente la prueba de velocidad de pulso ultrasónico para el limo (ML) de la primera fase, manteniendo las mismas condiciones del material, esta vez envolviendo las probetas en una hoja de acetato para después medir la velocidad de la onda, como se observa en la Fig. 6.15.



Figura 6.15 Proceso de medición de probetas de limo (ML) de longitud de 74 mm, con una hoja de acetato de confinamiento.

En este caso se realizaron seis lecturas de cada una de las probetas con la hoja de acetato. La tabla 6.20 presenta las lecturas obtenidas de la prueba VPU para las probetas de limo (ML) con la hoja de acetato como envoltente (revestimiento).

Tabla 6.20 Lecturas obtenidas en la prueba de VPU en probetas de limo (ML) de 74 mm con una hoja de acetato como envoltente.

MUESTRAS SECAS DE LIMO (ML) LONGITUD 74 mm CON REVESTIMIENTO											
Muestra	Peso	Longitud	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3	Tiempo 4	Tiempo 5	Tiempo 6	Promedio tiempo	Velocidad	Velocidad
	volumétrico de la muestra										
1.1	1343.1	7.42	70.00	71.10	154.60	155.7	157.7	158.2	127.88	0.058	580.3
2.1	1369.3	7.41	143.70	143.90	144.40	145.4	145.8	145.7	144.82	0.051	511.7
3.1	1385.0	7.48	72.60	72.30	71.10	72.6	73.7	72.2	72.42	0.103	1033.4
4.1	1423.1	7.41	73.30	197.30	199.40	209.10	73.8	101.5	142.40	0.052	520.3
5.1	1461.3	7.36	184.70	185.00	169.20	321.4	348	351.7	260.00	0.028	283.2
6.1	1491.1	7.36	123.00	122.90	123.10	125.7	123.7	123.5	123.65	0.060	595.5
7.1	1509.1	7.43	69.70	69.00	70.10	68.7	124	150	91.92	0.081	808.4

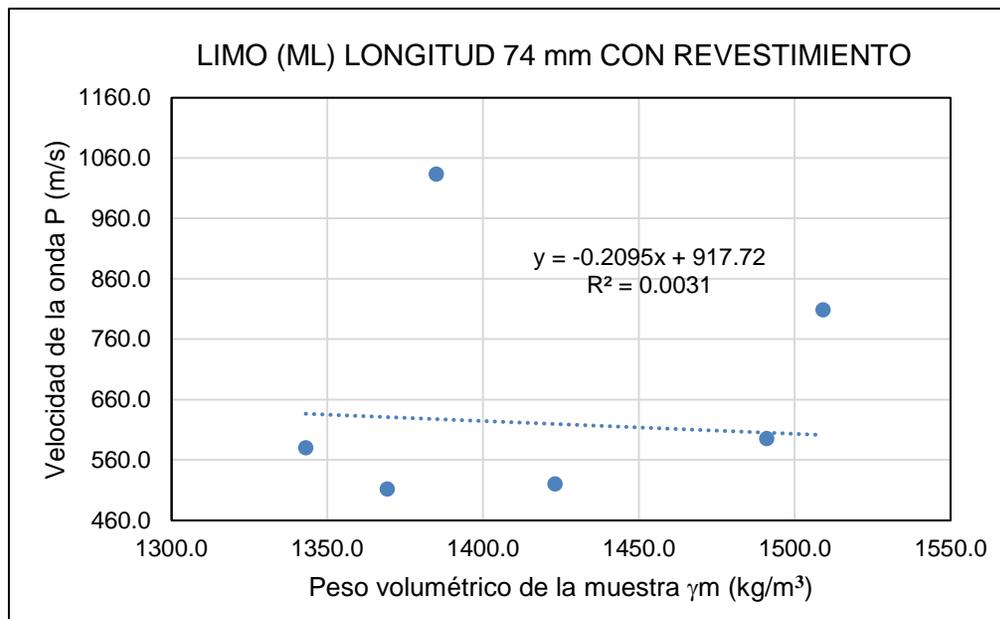


Figura 6.16 Gráfico de las velocidades para probetas de limo (ML) de 74 mm de longitud con una hoja de acetato como confinamiento.

El procedimiento de la colocación de la hoja de acetato (revestimiento) fue el mismo tanto para las probetas de grava limosa como las probetas de limo. En la tabla 6.20 y el gráfico de la Fig. 6.16 se observa que las mediciones son inconsistentes y esto se debe a que la superficie de la probeta y el transductor no están completamente en contacto. Este fenómeno fue visible en las probetas de limo, pero no en las de grava limosa, debido a que las probetas de limo tenían una humedad menor a 2.0% y el gel acoplante no humedeció toda la superficie, evidenciando las áreas con las que tuvo contacto el transductor, como se muestra en la Fig. 6.17. Asimismo, es importante señalar que al aplicar una ligera presión sobre la probeta para medir la velocidad se produce una restricción causada por algunos bordes de la hoja de acetato.

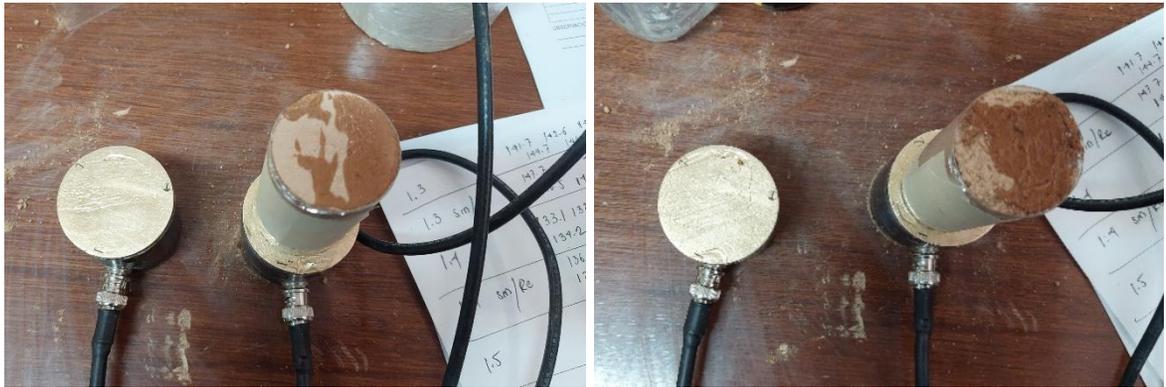


Figura 6.17 Probetas de limo (ML) con la marca del gel acoplador en las áreas de contacto.

Como resultado, se puede concluir que el uso de un material rígido en este caso ayudó a mantener la forma del cilindro para el suelo de grava limosa para realizar la prueba de VPU. Pero, por otro lado, la evidencia proporcionada por las probetas de limo indica que al utilizar un material como confinante, en este caso una hoja de acetato, se produce un contacto incompleto entre las probetas y los transductores, lo que genera inconsistencia en las lecturas y por lo tanto en los resultados en esta fase. A pesar de que el caso de la grava limosa se obtuvo un buen ajuste, las lecturas no son confiables, debido a que como se observó en las probetas de limo, las lecturas se pueden adjudicar al viaje de la onda por la hoja de acetato o en la hoja de acetato y parte de la muestra o sólo en la muestra. Causando una incertidumbre en la confiabilidad de las lecturas.

En resumen, el uso de un confinamiento para suelos del tipo grava limosa, no es factible debido a la gran inseguridad que presentan las lecturas y por ende los resultados.

6.4. RESULTADOS DE LA FASE IV

Para determinar la relación entre la resistencia al corte y la velocidad de las ondas P es necesario que al finalizar la prueba de VPU, se continuara con la prueba de compresión simple.

Desafortunadamente, las probetas de limo (ML) de la fase I perdieron su superficie plana después de que se completó la prueba de VPU, lo que hizo imposible realizar

la prueba de compresión simple reutilizando las probetas. Esto se debe a que el cabezal que se coloca sobre la probeta para comenzar la prueba debe estar nivelado; de lo contrario, el esfuerzo no se transmite de forma equitativa y se causa una falla prematura no representativa de la muestra.

Por ello, se fabricaron probetas con propiedades similares que las ensayadas en la primera prueba (VPU). Es importante mencionar que la humedad fue el principal factor que hizo difícil esta tarea, por lo que, se crearon más de 20 probetas y se escogieron las que tuvieron los pesos volumétricos más parecidos después del proceso de secado y posteriormente se llevó a cabo la prueba de compresión simple para probetas de limo (ML) con longitudes de 18 mm, 37 mm, 74 mm y 95 mm.

En el caso de las muestras de arena limosa, al finalizar las mediciones de la prueba de VPU se realizó el ensayo de compresión; sin embargo, sólo se obtuvieron resultados de las probetas que no se desboronaron en la prueba de VPU.

Mientras que, para las probetas de grava limosa al no mantener su forma sin el confinamiento, no fue posible llevar a cabo la prueba de compresión simple.

En las Tablas 6.21 a 6.24 y la Fig. 6.18 a 6.21, se muestran las propiedades de las probetas y el gráfico que correlaciona las variables: resistencia al corte y la velocidad de onda P.

Las correlaciones obtenidas para el limo (ML) a partir de la línea de tendencia tienen un comportamiento lineal, en donde al aumentar el peso volumétrico se tienen valores mayores tanto en la resistencia al corte como en la velocidad de la onda P, siendo el coeficiente de determinación (R^2) de 0.89 para probetas de limo (ML) de 18 mm de longitud, 0.92 para probetas de limo (ML) de 37 mm de longitud, 0.58 para probetas de limo (ML) de 74 mm de longitud y 0.45 para probetas de limo (ML) de 95 mm de longitud. Esto indica que hay un ajuste mayor para las probetas de 37 mm de longitud y el ajuste menor para las probetas de 95 mm de longitud. No obstante, estos resultados no son exactos ya que las probetas utilizadas en la prueba VPU no se utilizaron para la prueba de compresión simple, generando un

mayor grado de error, valor que se desconoce debido a que las diferencias entre los pesos volumétricos de las probetas son variables.

Asimismo, se puede observar que la resistencia al corte es mayor para las probetas de menor longitud y disminuye al aumentar la longitud de la probeta, este comportamiento se debe a la esbeltez de las probetas, Euler hace más de 200 años explicó que cuanto más esbelto sea la probeta, se comportará como un material menos rígido causando una resistencia menor (Hibbeler, 2006).

Tabla 6.21 Propiedades de las probetas de limo (ML) de 18 mm de longitud que se sometieron a la prueba de compresión simple.

MUESTRA	PESO VOLUMÉTRICO DE LA MUESTRA		RESISTENCIA AL CORTE	VELOCIDAD
	PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE	PRUEBA DE VPU		
	kg/cm ³		kg/cm ²	m/s
2	1405.4	1452.8	3.176	569.0
10	1458.7	1467.8	5.55	626.5
12	1511.0	1559.4	8.03	673.4
17	1466.1	1538.3	7.87	706.5
18	1533.8	1529.7	10.47	646.4
19	1563.6	1462.7	10.55	563.5

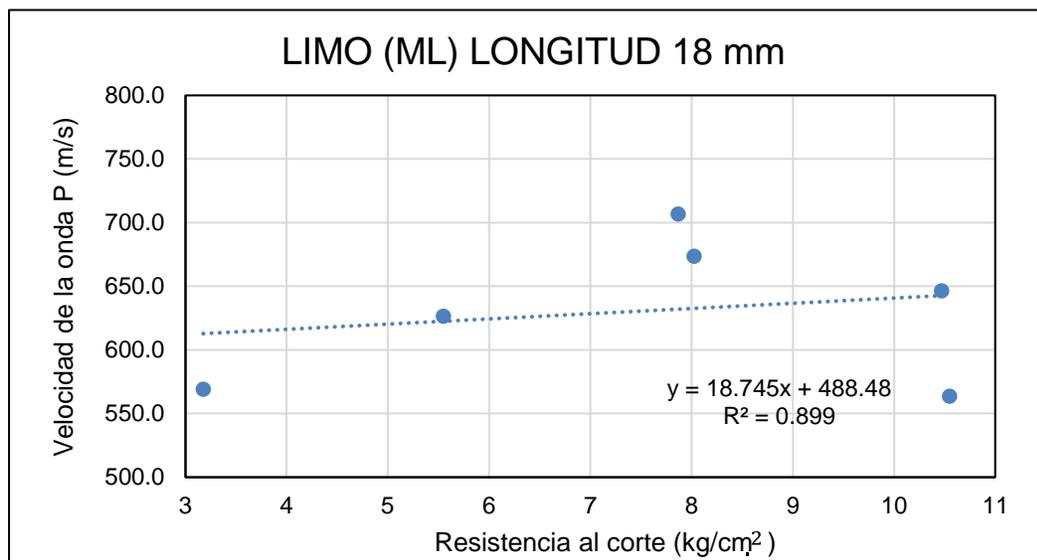


Figura 6.18 Gráfico de la correlación de la velocidad de la onda P y la resistencia al corte para probetas de limo (ML) de 18 mm de longitud.

Tabla 6.22 Propiedades de las probetas de limo (ML) de 37 mm de longitud que se sometieron a la prueba de compresión simple.

MUESTRA	PESO VOLUMÉTRICO DE LA MUESTRA		RESISTENCIA AL CORTE	VELOCIDAD
	PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE	PRUEBA DE VPU		
	kg/cm ³		kg/cm ²	m/s
4	1378.5	1383.8	2.25	623.5
5	1380.6	1432.2	1.94	660.6
10	1432.1	1549.6	3.45	740.3
15	1464.7	1474.7	3.67	705.9
19	1524.1	1474.9	5.32	649.9
22	1549.6	1519.5	5.30	737.2

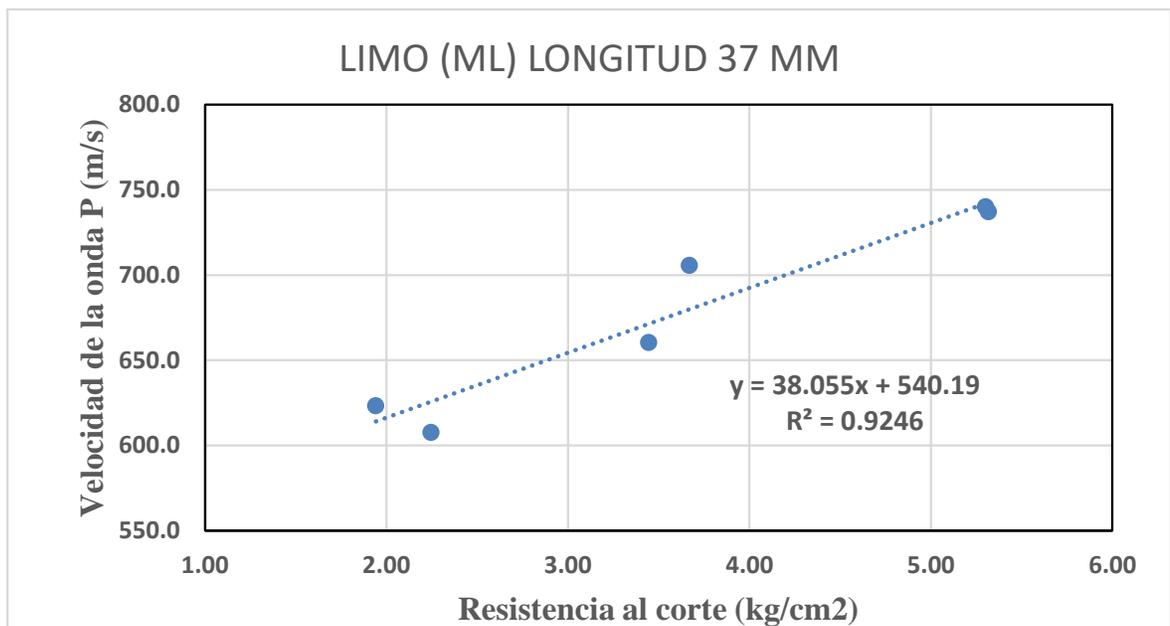


Figura 6.19 Gráfico de la correlación de la velocidad de la onda P y la resistencia al corte para probetas de limo (ML) de 37 mm de longitud

Tabla 6.23 Propiedades de las probetas de limo (ML) de 74 mm de longitud que se sometieron a la prueba de compresión simple.

MUESTRA	Peso Volumétrico de la muestra		RESISTENCIA AL CORTE	VELOCIDAD
	PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE	PRUEBA DE VPU		
	(kg/cm ³)		(kg/cm ²)	(m/s)
1	1393.5	1401.5	1.73	634.3
3	1369.0	1351.8	2.18	593.3
7	1429.6	1434.0	2.49	701.0
10	1467.8	1477.8	3.47	722.8
16	1506.1	1498.8	5.26	705.8
21	1526.3	1524.6	5.32	760.3

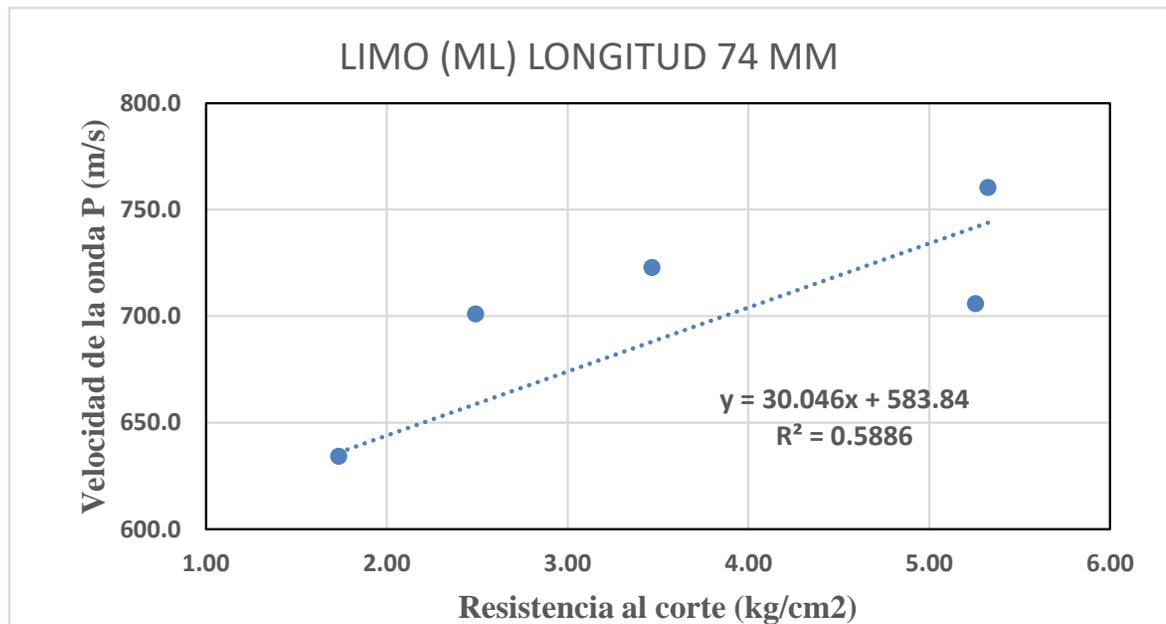


Figura 6.20 Gráfico de la correlación de la velocidad de la onda P y la resistencia al corte para probetas de limo (ML) de 74 mm de longitud

Tabla 6.24 Propiedades de las probetas de limo (ML) de 95 mm de longitud que se sometieron a la prueba de compresión simple.

MUESTRA	Peso Volumétrico de la muestra		RESISTENCIA AL CORTE (kg/cm ²)	VELOCIDAD (m/s)
	PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE	PRUEBA DE VPU		
	(kg/cm ³)			
1	1404.3	1400.9	1.74	814.3
5	1438.9	1447.5	1.29	884.6
6	1455.8	1450.6	1.67	933.2
9	1470.0	1472.4	2.42	915.2
12	1482.1	1486.5	3.02	993.1

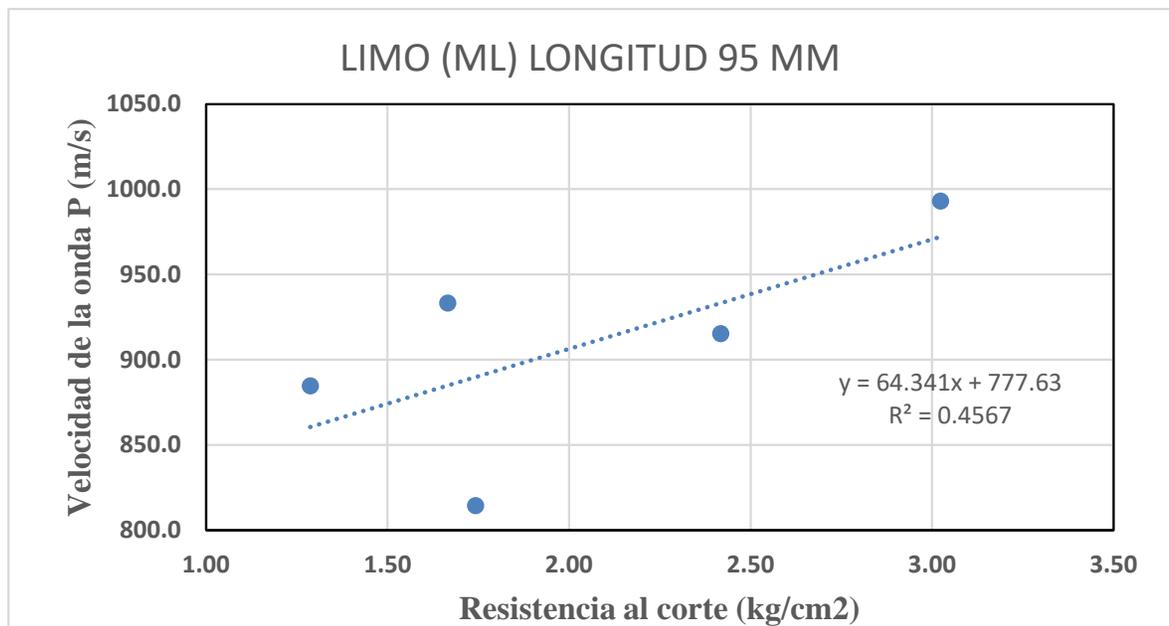


Figura 6.21 Gráfico de la correlación de la velocidad de la onda P y la resistencia al corte para probetas de limo (ML) de 95 mm de longitud.

En el caso de las probetas limosa arena (SM) con una longitud de 74 mm, el comportamiento es consistente con el comportamiento encontrado en la correlación entre el peso volumétrico y la velocidad de la onda P: una parábola invertida, con un ajuste de $R^2 = 0.78$. Los datos de cada probeta se muestran en la Tabla 6.25 y en la Fig. 6.22, junto con la correlación entre la resistencia al corte y la velocidad de

onda P para una arena limosa (SM). Lo que sustenta los hallazgos encontrados en el capítulo “resultados de la fase II”.

Tabla 6.25 Propiedades de las probetas de arena limosa (SM) de 74 mm de longitud que se sometieron a la prueba de compresión simple.

MUESTRA	Peso Volumétrico de la muestra (kg/cm ³)	RESISTENCIA AL CORTE (kg/cm ²)	VELOCIDAD (m/s)
A	-	-	-
B	1282.1	0.3	171.0
C	1304.7	0.357	160.3
D	1319.1	0.36	157.0
E	1356.3	0.49	154.5
F	-	-	-
G	1379.6	0.62	156.4
H	1405.3	0.59	159.0
I	1426.6	0.69	164.2
J	1442.6	0.76	167.5

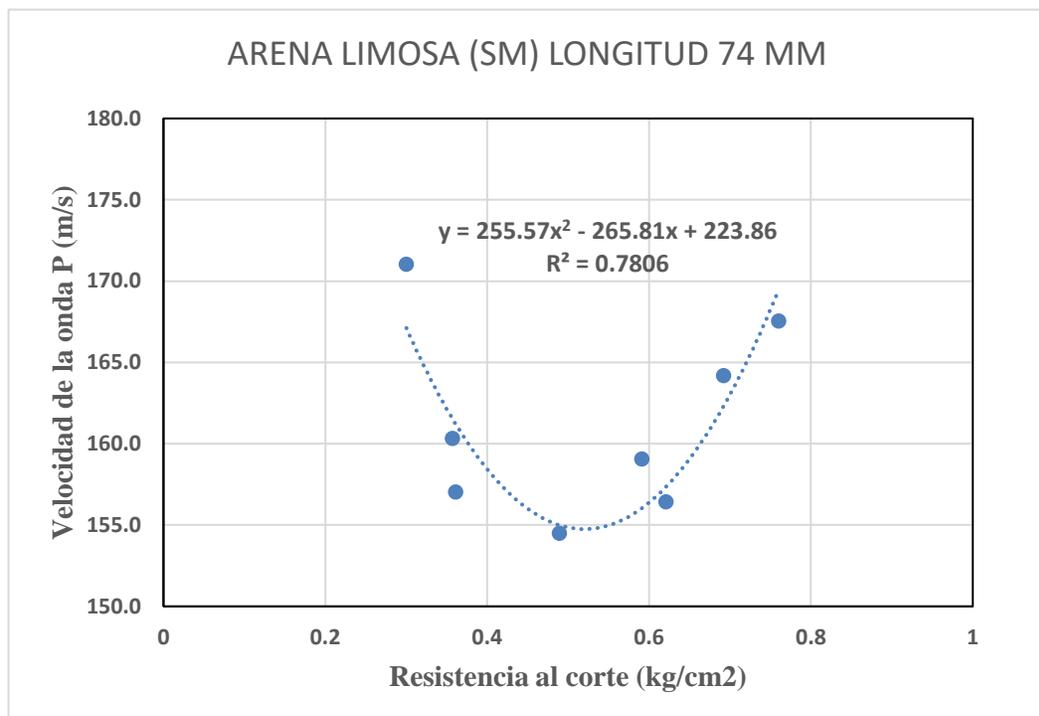


Figura 6.22 Gráfico de la correlación de la velocidad de la onda P y la resistencia al corte para probetas de arena limosa (SM) de 74 mm de longitud.

En el caso de las probetas de arena limosa (SM) con una longitud de 95 mm, al igual que las probetas de 74 mm sólo se obtuvo la resistencia al corte de las

probetas utilizadas en la prueba de VPU. Debido a la inestabilidad de las probetas, para más de la mitad de ellas no se realizó ni la medición de velocidad de la onda P ni la resistencia al corte. Por ello, sólo se obtuvieron los resultados que corresponden a las densidades más altas del experimento.

Tabla 6.26 Propiedades de las probetas de arena limosa (SM) de 95 mm de longitud que se sometieron a la prueba de compresión simple.

MUESTRA	Peso Volumétrico de la muestra (kg/cm ³)	RESISTENCIA AL CORTE (kg/cm ²)	VELOCIDAD (m/s)
M	1272.6		
N	1256.4		
O	1291.0		
P	1302.7		
Q	1321.7		
R	1312.2		
S	1359.4	0.47	166.4
T	1354.6	0.55	168.8
U	1394.1	0.67	177.9
V	1420.7	0.75	179.1

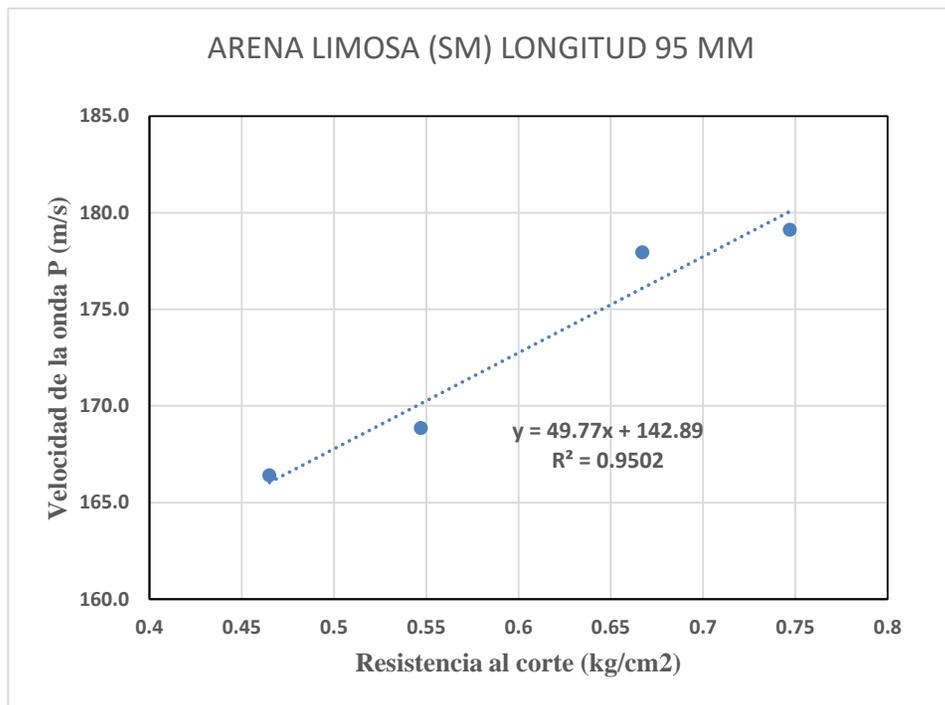


Figura 6.23 Gráfico de la correlación de la velocidad de la onda P y la resistencia al corte para probetas de arena limosa (SM) de 95 mm de longitud.

Los datos de las probetas se muestran en la Tabla 6.26 y la Figura 6.23, junto con la correlación entre la velocidad de la onda P y la resistencia del corte. Es posible ver que la velocidad de la onda P aumenta junto con la resistencia al corte a medida que aumenta el peso volumétrico, con un ajuste de $R^2 = 0.95$.

7. CONCLUSIONES

Como resultado de la fase I de la experimentación, se determinó que la longitud de las probetas de limo (ML) con un diámetro de 37 mm y con una humedad por debajo del 1.5% tiene un efecto en la velocidad de la onda P. De los gráficos obtenidos en la fase I de la experimentación, se observa que las velocidades menores se registraron en las probetas de 18 mm en un rango de 563.5 m/s a 706.5 m/s, mientras que las velocidades mayores se obtuvieron en las probetas de 95 mm en un rango de 594.2 m/s a 762.6 m/s, con una variación de porcentaje entre ellos de 17.72% a 21.23%.

Además de eso, se descubrió que la relación entre las variables relativas a la velocidad de la onda P y los pesos volumétricos es lineal, con un ajuste de $R^2=0.77$ a $R^2=0.98$. Adicionalmente, se determinó que la velocidad de la onda P aumenta a medida que el peso volumétrico del espécimen aumenta de forma lineal para un suelo limoso de alta compresibilidad (ML) con humedades menores al 1.5% con un diámetro de 37 mm y una longitud de 18 mm, 37 mm, 74 mm, y 95 mm.

No obstante, se estableció que la prueba de VPU remueve parte de la superficie plana que la probeta, al mantener contacto con el acoplante y el transductor, alterando sus condiciones geométricas iniciales.

Para la fase II de la experimentación, se determinó que la velocidad de onda P que viaja por un suelo arenoso limoso (SM) en probetas de 74 mm de longitud, con una humedad de 22.7% a 26.2% con un grado de saturación de 41% a 55.4%, disminuye en comparación con un suelo limoso de la fase I, en donde se registraron velocidades de 154.5 m/s a 179.1 m/s, que se atribuye al aumento de humedad.

También, se estableció que con el aumento de humedad en probetas de arena limosa (SM) con una longitud de 95 mm inestabiliza las probetas con menor densidad, provocando colapso de las probetas antes o durante la prueba de VPU.

En la correlación entre la velocidad de la onda P y los pesos volumétricos de las probetas de arena limosa (SM) de 74 mm de longitud, se tiene un ajuste de $R^2=0.94$, con un comportamiento de parábola invertida. Este comportamiento se debe a que para los pesos volumétricos menores se tiene un grado de saturación menor que va en aumento, por lo que, al tener un menor grado de saturación en comparación con las probetas con mayor peso volumétrico, existe una menor cantidad de poros llenos por agua, por lo que, las velocidades disminuyen al incrementar el grado de saturación, mientras que para las probetas con los pesos volumétricos mayores la velocidad aumenta debido al incremento de la densidad, siendo el punto de inflexión un valor muy cercano al peso volumétrico seco máximo de la arena limosa.

Para la fase III, se determinó que el uso de un revestimiento rígido (hoja de acetato) para contener las probetas de grava limosa (GM), tiene un efecto en las mediciones de velocidad de la onda P, debido a que el revestimiento no permite un contacto completo entre la superficie plana de la probeta y el transductor del equipo, obteniendo lecturas inestables y con un grado de incertidumbre alto. Este fenómeno se observó en las probetas de limo (ML) que, al contener una baja humedad fue posible observar las zonas con las que efectivamente hubo contacto entre los transductores y la probeta al realizar la prueba de VPU. Por lo que, no se recomienda su uso.

Para la fase IV, se tiene que para la correlación entre la velocidad de la onda P y de la resistencia al corte (valor obtenido de la prueba de compresión simple), el comportamiento es lineal en las probetas de limo (ML), con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.58$ a $R^2 = 0.92$, en donde se observa que al incrementar la resistencia al corte también incrementa la velocidad de la onda P.

Por otro lado, para las probetas de arena limosa (SM) se registró el comportamiento de una parábola invertida confirmando los resultados obtenidos en la fase II.

Con toda la información anterior, se puede concluir que la prueba de velocidad de pulso ultrasónico es aplicable como una prueba indirecta para un limo (ML) con un diámetro de 37 mm y longitudes de 18, 37, 74 y 95 mm con humedades menores a 1.5%, mientras que, para probetas de arena limosa (SM) se recomienda su uso solo para longitudes de 74 mm.

El método VPU es útil para determinar la calidad de los materiales. En este estudio, se descubrió que el uso de un método no destructivo produce resultados factibles en un limo (ML) con un contenido de humedad inferior al 1,5 %. La obtención de ecuaciones empíricas permite para determinar el peso de las muestras y su resistencia al corte, a través de la velocidad de las ondas P.

Por otra parte, los resultados para los dos materiales restantes, arena limosa (SM) y grava limosa (GM) con humedad óptima, mostraron dificultades en el experimento. Sin embargo, realizar un experimento más amplio con cada uno de los materiales permitiría conocer más a fondo cada uno y, en consecuencia, las condiciones requeridas para llevar a cabo el uso del método VPU en este tipo de materiales, ampliando los hallazgos del estudio.

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan líneas de investigación, que permitan un conocimiento más amplio de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico aplicado a la geotecnia:

La metodología descrita puede aplicarse a suelo finos y puede ser un gran aporte para obtener los comportamientos de diversos suelos finos: limos y arcillas, con diferentes propiedades índice y granulometría, que permitan determinar, cómo afectan estas características del suelo a la velocidad de la onda P.

En la fase I de esta investigación se presenta el comportamiento de limo (ML) con humedades bajas, por lo que, puede ser interesante descubrir que sucede cuando

hay incrementos importantes el contenido de agua y continuar con la variación de los pesos volumétricos.

Como mejoramiento de la metodología descrita, se pueden utilizar otros tipos de revestimientos que puedan dar la estabilidad a las muestras pero que no interfieran con el contacto entre la muestra y el equipo de velocidad de pulso ultrasónico. Esta aportación ampliaría el uso de esta prueba a suelos gruesos.

Puede ser útil, utilizar esta metodología con otro tipo de equipo de velocidad de pulso ultrasónico que permita la obtención del arribo tanto de las ondas P como de las ondas S, que serviría para determinar también las propiedades dinámicas del suelo a través de una prueba fácilmente aplicable, rápida y de bajo costo.

El uso de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico podría ampliarse para comprender mejor cómo se comportan los diferentes tipos de suelos. Este conocimiento podría usarse para controlar la calidad de terraplenes, plataformas, suelos mejorados, suelo-cementos, etc., de forma más rápida.

9. REFERENCIAS

Abdelhedi, M., Aloui, M., Mnif, T., y Abbes, C. (2017). "Ultrasonic velocity as a tool for mechanical and physical parameters prediction within carbonate rocks". *Geomechanics and Engineering*, 13(3), 371-384.

Abdelhedi, M., Jabbar, R., Mnif, T., y Abbes, C. (2020). "Ultrasonic velocity as a tool for geotechnical parameters prediction within carbonate rocks aggregates". *Arabian Journal of Geosciences*, 13(4), 1-11.

Arman, H., y Paramban, S. (2020). "Correlating natural, dry, and saturated ultrasonic pulse velocities with the mechanical properties of rock for various sample diameters". *Applied Sciences*, 10(24), 9134.

Basu, A., y Aydin, A. (2006). Evaluation of ultrasonic testing in rock material characterization. *Geotechnical Testing Journal*, 29(2), 117-125.

Benavente, D. (2006). Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales.

Boulanouar, A., Rahmouni, A., Boukalouch, M., Samaouali, A., Géraud, Y., Harnafi, M., y Sebbani, J. (2013). Determination of thermal conductivity and porosity of building stone from ultrasonic velocity measurements. *Geomaterials*, 2013.

Camacho Cuesta, L. H. (2018). Identificación de método evaluador de calidad de imagen en equipos de ultrasonido a partir de histogramas.

Carabias Lillo, J., Provencio, E., de la Maza Elvira, J., y Ruiz Corzo, M. (1999). "Programa de manejo reserva de la biosfera Sierra Gorda México", Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales).

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Luna-González, L., y Gámez-González, F. J. (2005). "Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(1), 1-18.

Ceccotti, S., Forteza, C., y Luberti, F. (2007). El diagnóstico en clínica estomatológica. Ed. Médica Panamericana.

Céspedes García, M. A. (2012). Resistencia a la compresión del concreto a partir de la velocidad de pulsos de ultrasonido.

Collado Boira, E., Aguilera Fernández, V., Salvador Marín, M. (2022). Manual de medicina subacuática. España: Amazing Books.

Chawre, B. (2018). "Correlations between ultrasonic pulse wave velocities and rock properties of quartz-mica schist". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(3), 594-602.

Cheng, Z. Y., y Leong, E. C. (2013). Ultrasonic Testing of Unsaturated Soils. In *Multiphysical Testing of Soils and Shales* (pp. 105-110). Springer Berlin Heidelberg.

Das, B. M. (2001). *Fundamentos De Ingeniería De Cimentaciones*.

Das, B. M. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica (Cuarta edición ed.). Mexico: CENGAGE Learning.

Christ, M., y Park, J. B. (2009). Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*, 58(3), 136-142.

Crespo Villalaz, C. (2004). Suelos y Cimentaciones. LIMUSA: LIMUSA, SA de CV Grupo Noriega Editores.

Eberli, G. P., Baechle, G. T., Anselmetti, F. S., y Incze, M. L. (2003). "Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks". *The Leading Edge*, 22(7), 654-660.

Fernández, J. A. G. (2017). "Ingeniería de Vías Férreas".

French, A. P. (2012). Vibraciones y ondas. España: Reverte.

Garia, S., Pal, A. K., Nair, A. M., y Ravi, K. (2021). "Ultrasonic P wave velocity measurement of sedimentary rocks in laboratory and its dependency on different parameters by using multivariate regression analysis". In *Seismic Hazards and Risk* (pp. 337-349). Springer, Singapore.

García, S. 2013. Aplicabilidad del método del cono para medir los límites líquidos y plásticos de suelos de Guatemala. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Civil - Universidad San Carlos de Guatemala. 19p.

González Ayala, Vicente A., (2011). Análisis y aplicación de técnicas ultrasónicas para ensayos no destructivos en materiales no homogéneos, Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, Tesis Doctoral. Inédito.

Gomez-Heras, M., Benavente, D., Pla, C., Martinez-Martinez, J., Fort, R., y Brotons, V. (2020). "Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements". *Construction and Building Materials*, 261, 119996.

Guerra, J. L. (2018). Manual de fisioterapia 2a. Editorial El Manual Moderno.

Gutiérrez León, E. F. (2018). Caracterización mecánica de la " Jigsaw Breccia" de Miraflores-Quinchia.

Grigioni, L., Jardón, A., Vettorel, S., y Farina, J. (2017). 7502-17 FÍSICA Ondas Mecánicas.

Grønbech, G. L., Nielsen, B. N., y Ibsen, L. B. (2011). Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of Casagrande and Fall Cone Apparatus. *Age (mil. Years)*, 40, 46-53.

Hamdi, E., y Lafhaj, Z. (2013). "Microcracking based rock classification using ultrasonic and porosity parameters and multivariate analysis methods". *Engineering geology*, 167, 27-36.

Hardin, B. O., & Richart, F. E. (1963). "Elastic Wave Velocities in Granular Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 89(1), 33-65.

Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica de materiales*. Pearson educación.

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2021. "Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2021". Consultado el 06 de febrero, 2021 en https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvin_egi/productos/nueva_estruc/889463904847.pdf

Kahraman, S. A. İ. R. (2001). "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 981-994.

Kahraman, S. A. İ. R. (2002). "Estimating the direct P-wave velocity value of intact rock from indirect laboratory measurements". *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 39(1), 101-104.

Kurtulus, C., Bozkurt, A., y Endes, H. (2012). "Physical and mechanical properties of serpentized ultrabasic rocks in NW Turkey". *Pure and applied geophysics*, 169(7), 1205-1215.

Kurtulus, C. E. N. G., Cakir, S., y Yoğurtcuoğlu, A. (2016). "Ultrasound Study of Limestone Rock Physical and Mechanical Properties". *Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 52(6).

Narváez Campo, P. E. (2011). Efectos del fracturamiento en muestras de rocas en la propagación de ondas. Tesis doctoral. Inedito.

Marinos, P., Hoek, E., y Marinos, V. (2006). "Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 129-142.

Miura, K., Yoshida, N., Kim, Y. (2001). Frequency dependent property of waves in saturated soil. *Soils and Foundations*, 41(2), 1-19.

Mora, A. F. (2010). Metalurgia práctica. Hipertexto.

Moradian, Z. A., y Behnia, M. (2009). "Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test". *International Journal of Geomechanics*, 9(1), 14.

Ortega, F., Mitre, L.M., Roldán, J., Aranda, J.J., Morán, D., Alaniz, S.A. y Nieto, A.F. (1992). "Carta Geológica de la República Mexicana Esc 1: 2.000.000". Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, Instituto de Geología y Secretaría de Energía, Minas e Industria. 1 Mapa con texto explicativo, 74 pág.

Otumudia, E., Hamidi, H., Jadhawar, P., y Wu, K. (2022). Effects of reservoir rock pore geometries and ultrasonic parameters on the removal of asphaltene deposition under ultrasonic waves. *Ultrasonics sonochemistry*, 83, 105949.

Pacheco Hernández, A. V. (2021). Influencia de la CVMx y CBCst en algunas propiedades de concretos ternarios.

Pérez Vega, C., Zamanillo Sainz de la Maza, J. M. (2003). Fundamentos de televisión analógica y digital. España: Universidad de Cantabria.

Pérez, P. J., y Salvatierra, E. (2014). Fundamentos de física (Vol. 76). Universitat de Lleida.

Resnick, R., Halliday, D., y Krane, K. (2004). Física Vol. I.I.

Roller, D. E., y Blum, R. (2020). Física. Tomo I: Mecánica, ondas y termodinámica (Volumen 1). Reverté.

Singh, H. O., Ansari, T. A., Singh, T. N., y Singh, K. H. (2022). "Development of Statistical Models to Predict the Mechanical Properties of Some Metamorphic Rocks from P-Wave Velocity and Certain Physical Properties". Geotechnical and Geological Engineering, 1-22.

Solís Carcaño, R., y Baeza Pereyra, J. (2003). Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 26(1), 45-55.

Song, I., Suh, M., Woo, Y. K., y Hao, T. (2004). "Determination of the elastic modulus set of foliated rocks from ultrasonic velocity measurements". Engineering Geology, 72(3-4), 293-308.

Sultanov, K., Loginov, P., Ismoilova, S., y Salikhova, Z. (2019). Wave processes in determining mechanical characteristics of soils. In E3S Web of Conferences (Vol. 97, p. 04009). EDP Sciences.

Tarback, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., y Cientificas, A. T. (2005). Ciencias de la Tierra (Vol. 1). Madrid: Pearson Educación.

Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., y Sheriff, R. E. (1990). Applied geophysics. Cambridge university press.

Uyanık, O., Sabbağ, N., Uyanık, N. A., y Öncü, Z. (2019). Prediction of mechanical and physical properties of some sedimentary rocks from ultrasonic velocities. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78, 6003-6016.

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

Vasconcelos G, Lourenço PB, Alves CA, Pamplona J (2007) "Prediction of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and Schmidt hammer hardness".

Vidaud, E., & Vidaud, I. (2016). Ultrasonido: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. *Construcción y tecnología en concreto*, 31-35.

Villalaz, C. C. (2005). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Limusa.

Weidinger, D. M., Ge, L., y Stephenson, R. W. (2009). Ultrasonic pulse velocity tests on compacted soil. In *Characterization, Modeling, and Performance of Geomaterials: Selected Papers From the 2009 GeoHunan International Conference* (pp. 150-155).

Yasar, E., y Erdogan, Y. (2004). "Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5), 871-875.

Yu, W. A. N. G., Xiao, L. I., Ruilin, H. U., Yanfang, W. U., y Wei, G. A. O. (2015). Review of reasearch process and application of ultrasonic testing for rock, 23(2), 287-300