

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Una Institución Adventista

**“Determinación del Revestimiento del Tunnel Liner Mediante el Modelamiento
Geotécnico Aplicando el Método de Elementos Finitos, en el Distrito de La Perla Callao”**

Autores:

Bach. Edson Jhoel Chilón Correa

Bach. Max Marlon Huaman Fernandez

Asesor:

Mg. Leonel Chahuares Paucar

Lima, Noviembre del 2019

ANEXO 07 DECLARACIÓN JURADA DE AUTORIA DEL INFORME DE TESIS

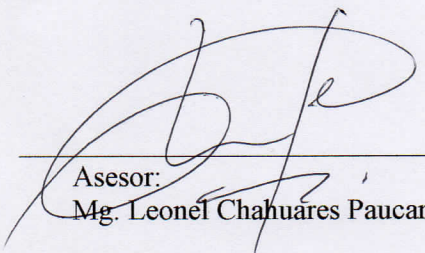
Mg. Leonel Chahuares Paucar de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: “DETERMINACION DEL REVESTIMIENTO DEL TUNNEL LINER MEDIANTE EL MODELAMIENTO GEOTECNICO APLICANDO EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS, EN EL DISTRITO DE LA PERLA CALLAO” constituye la memoria que presenta los bachilleres Edson Jhoel Chilón Correa y Max Marlon Huaman Fernandez para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Civil, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en la ciudad de Lima, a los 18 días de diciembre del año 2019.

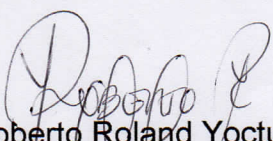

Asesor:
Mg. Leonel Chahuares Paucar

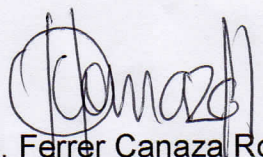
Determinación del Revestimiento del Tunnel Liner Mediante el Modelamiento Geotécnico Aplicando el Método de Elementos Finitos, en el Distrito de La Perla Callao.

TESIS

Presentada para optar el título profesional de Ingeniero Civil

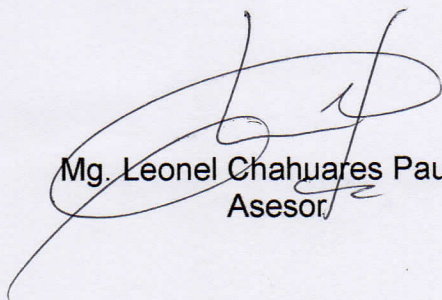
JURADO CALIFICADOR


Ing. Roberto Roland Yoctun Ríos
Presidente


Ing. Ferrer Canaza Rojas
Secretario


Ing. David Diaz Garamendi
Vocal


Ing. Reymundo Jaulis Palomino
Vocal


Mg. Leonel Chahuares Paucar
Asesor

Lima, 18 de Diciembre del 2019

Dedicatorias:

Dedicado a mi Dios, a mis padres Rebeca y Nestor. A mis tíos Lázaro, Moisés, Jacobeth y Eva. A mis hermanos Gilmer, Roxana, Wilder, Henry, Rosa, Alex y Anita. También va dedicado para aquellas personas que dejaron este mundo pero que nunca dejarán mi corazón, ellos son mis abuelos Alberto y Susana, mis tíos Job y Marina, y a Yolanda quien me cuido y me quiso como una madre. A todos ellos dedico el presente trabajo por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ellos. Me guiaron y formaron con reglas y con algunas libertades, pero su fin siempre fue motivarme constantemente para alcanzar mis anhelos.

EDSON. J. CH. C.

Al forjador de mi camino a mi Padre Celestial. Dedicado también a mis padres, Gregoria y Julio, quienes con su inmenso amor siempre estuvieron a mi lado con su constante apoyo y motivación para lograr cada una de mis metas, y más aún en este logro que es tan importante para mi vida. A mis hermanos Julio, Iván e Isaac y con todo el amor y cariño a mi esposa Geraldine y a mi hijo Jared, quienes son mi apoyo emocional. Dedicado a todos ellos quienes día a día fueron mi mayor motivación.

MAX. M. H. F.

Agradecimientos:

Agradecer a Dios por sus cuidados y bendiciones, a mis padres por su incondicional apoyo moral y económico.

A mi primo el Ing. William, a un gran amigo el Ing. Mario y a mi hermano el Ing. Edwin quienes me inculcaron e instruyeron en el conocimiento de esta hermosa carrera.

Agradecer enormemente al personal de la empresa TCINGE SAC, de manera especial al Ing. Carlos y al Ing. Percy, quienes contribuyeron para el desarrollo de este trabajo, ya que sin ellos no hubiese sido posible el realizar esta tesis.

Aquellas personas por su apoyo de manera directa o indirecta para culminar con este objetivo ellos son: Victoria, Angélica, Gloria, Marina, Abel, Segundo, Julia, Isabel.

Por su paciencia y dedicación en la revisión de este trabajo a los ingenieros Leonel Chahuares, Ferrer Canaza y David Díaz.

EDSON. J. CH. C.

Agradezco a Dios por cuidarme en el día a día y permitirme alcanzar este objetivo. Así mismo también agradezco a mis padres, quienes nunca dudaron en apoyarme durante mi vida de formación profesional.

Agradecer también de manera muy especial a los trabajadores de la empresa TCINGE SAC, quienes nos brindaron su apoyo incondicional para hacer realidad este trabajo. Al Ing. Percy y al Ing. Carlos, gracias a ellos por mostrar su interés en que este trabajo se haga realidad.

Al Ing. Leonel Chahuares por su orientación, sus observaciones y recomendaciones durante la investigación.

Al Ing. David y al Ing. Ferrer Canaza, por sus palabras de motivación y sus recomendaciones.

MAX. M. H. F.

Índice General

ÍNDICE GENERAL.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIX
SÍMBOLOS USADOS:.....	XX
RESUMEN.....	XXI
ABSTRACT.....	XXII
CAPITULO I. EL PROBLEMA.....	23
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	23
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
1.3. OBJETIVOS.....	26
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	26
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	26
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	27
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA/ MARCO TEÓRICO.....	29
2.1. ANTECEDENTES.....	29
2.1.1. <i>Antecedente de Investigación 01</i>	29
2.1.2. <i>Antecedente de Investigación 02</i>	31
2.1.3. <i>Antecedente de Investigación 03</i>	33
2.1.4. <i>Antecedente de Investigación 04</i>	35
2.1.5. <i>Antecedente de Investigación 05</i>	37
2.2. MARCO TEÓRICO.....	40
2.2.1. <i>El túnel</i>	40
2.2.2. <i>Clasificación de Túneles</i>	40
2.2.2.1. Según su Servicio.....	40
2.2.2.2. Según su Localización.....	40
2.2.2.3. Según la Geología.....	41

2.2.3.	<i>Tipos de Revestimiento</i>	41
2.2.3.1.	Tipos de Sistemas de Revestimiento Primario	42
2.2.3.1.1.	Túneles de Roca.....	42
2.2.3.1.2.	Túneles de Suelo.....	42
2.2.4.	<i>Planchas de Acero Corrugado (Planchas Liner)</i>	44
2.2.5.	<i>Estudios Previos al Diseño de Tunnel liner</i>	47
2.2.5.1.	Caracterización del Suelo para Diseño del Tunnel liner	47
2.2.5.1.1.	Exploración de Campo.....	47
2.2.5.1.2.	Ensayo de Laboratorio.	51
2.2.6.	<i>Cálculo Estructural</i>	64
2.2.6.1.	Resistencia a la compresión.....	64
2.2.6.2.	Resistencia a la conexión empernada.....	66
2.2.6.3.	Rigidez a la manipulación	67
2.2.7.	<i>Métodos de estimación de deformaciones inducida por excavación de túneles</i> ...	68
2.2.7.1.	Métodos Empíricos	68
2.2.7.1.1.	Modelo tradicional de Peck.....	69
2.2.7.2.	Métodos Analíticos.	72
2.2.7.3.	Métodos Numéricos.	74
2.2.7.3.1.	Método de elemento de viga con soporte elástico.....	76
2.2.7.3.2.	Método de elemento finito (FEM).....	77
2.2.7.3.3.	Método de diferencia finita (FDM)	84
2.2.7.3.4.	Método del elemento de límite (BEM)	85
2.2.7.3.5.	Método de elemento discreto (DEM)	86
2.2.8.	<i>Análisis de Esfuerzos en la Interacción Suelo-Estructura Mediante la Metodología AASHTO</i>	86
2.2.8.1.	Definición de Interacción Suelo-Estructura	86
2.2.8.2.	Carga Muerta:	87
2.2.8.3.	Carga Viva	88
2.3.	ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA MEDIANTE EL SOFTWARE PLAXIS 2D	89
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....		91

3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	91
3.1.1.	<i>El fin que se persigue</i>	91
3.1.2.	<i>Tipos de datos analizados</i>	91
3.1.3.	<i>La metodología para demostrar la hipótesis</i>	91
3.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	91
3.3.	LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	92
3.3.1.	<i>Delimitación espacial</i>	92
3.4.	UBICACIÓN.....	92
3.5.	VARIABLES	92
3.5.1.	<i>Variables Dependientes</i>	92
3.5.2.	<i>Variables Independientes</i>	93
3.6.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	93
3.7.	PROCESO DE ANÁLISIS CON LA METODOLOGÍA AASHTO.....	96
3.8.	PROCESO DE ANÁLISIS MEDIANTE EL SOFTWARE PLAXIS 2D.....	97
3.9.	MATERIALES Y EQUIPO	98
3.10.	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS.....	98
3.10.1.	<i>Trabajo en Campo</i>	98
3.10.1.1.	Excavación e identificación de calicatas	99
3.10.1.2.	Ensayo de Densidad de Campo Método del Cono de Arena.....	100
3.10.1.3.	Ensayo de Refracción Sísmica y ensayo de Medición de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales (MASW).....	101
3.10.2.	<i>Trabajo en laboratorio</i>	104
3.10.2.1.	Análisis granulométrico por tamizado.....	104
3.10.2.2.	Limite Líquido	104
3.10.2.3.	Limite plástico.....	105
3.10.2.4.	Contenido de humedad.	106
3.10.2.5.	Ensayos de corte directo.....	106
3.10.2.6.	Ensayo de densidad máxima y mínima.	107
3.10.2.6.1.	Densidad Máxima	107
3.10.2.6.2.	Densidad mínima	108
3.10.2.7.	Ensayo de compresión edométrica.	108

3.10.3.	<i>Diseño del espesor de tunnel liner mediante la metodología ASSHTO</i>	109
3.10.3.1.	Cálculo de cargas	109
3.10.3.2.	Criterios de diseño.....	112
3.10.4.	<i>Análisis mediante el software Plaxis 2D</i>	113
3.10.4.1.	Consideraciones de diseño.....	115
3.10.4.2.	Modelo constitutivo de los materiales.....	115
3.10.4.3.	Cálculo estructural.....	116
3.10.4.3.1.	Resistencia a Compresión	117
3.10.4.3.2.	Resistencia de la conexión emperrada.....	120
3.10.4.3.3.	Rigidez a la manipulación	121
3.10.4.4.	Formulación del modelo	122
3.10.4.4.1.	Geometría para la discretización en elementos finitos.	122
3.10.4.4.2.	Modelo geométrico.....	123
3.10.4.4.3.	Propiedades de los materiales.....	125
3.10.4.4.4.	Condiciones iniciales	128
3.10.4.4.5.	Fases de cálculo.....	130
3.10.4.4.6.	Fase I – Ingreso y salida del tunnel liner: carga vehicular y muro de contención. 130	
3.10.4.4.7.	Fase II – Ingreso y salida del tunnel liner: Colocación de planchas metálicas diámetro del túnel 2300mm.	133
3.10.4.4.8.	Fase III – Ingreso y salida del tune liner: Colocación de Planchas Metálicas Diámetro de Túnel de 1500mm.	137
3.10.4.4.9.	Factor de seguridad (F.S).	143
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.		148
4.1.	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	148
4.2.	DISEÑO DEL ESPESOR DE TUNNEL LINER MEDIANTE LA METODOLOGÍA AASHTO	150
4.2.1.	<i>Cargas</i>	150
4.2.2.	<i>Criterios de diseño</i>	152
4.2.2.1.	Resistencia de las uniones	152
4.2.2.2.	Resistencia al Pandeo	153
4.2.2.3.	Resistencia en el proceso de manipulación e instalación	153

4.2.2.4.	Deformación o Aplanamiento de la Sección del Túnel.....	154
4.2.2.5.	Resumen de dimensionamiento del Tunnel Liner	154
4.3.	DISEÑO DEL ESPESOR DEL TUNNEL LINER MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EMPLEANDO EL SOFTWARE PLAXIS 2D.	154
4.3.1.	<i>Calculo Estructural</i>	154
4.3.1.1.	Resistencia a la compresión.....	154
4.3.1.2.	Resistencia a la conexión emperrada.....	156
4.3.1.3.	Rigidez a la manipulación	157
4.3.2.	<i>Análisis de Deformaciones por Elementos Finitos</i>	158
4.3.2.1.	Fase I, Ingreso y Salida del Tunnel Liner, Cargas Vehiculares y Muros de Contención	158
4.3.2.2.	Fase II, Ingreso y Salida del Tunnel liner, Colocación de Planchas Metálicas Diámetro de túnel 2300 mm.....	159
4.3.2.3.	Fase 3, Ingreso y Salida del Tunnel Liner, Colocación de Planchas Metálicas Diámetro de túnel 1500 mm.....	159
4.3.2.4.	Factor de seguridad	160
	CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	162
	REFERENCIAS.....	165
	ANEXOS	169

Índice de Tablas

Tabla 1: Uso de Sistemas de Soporte Primario para Túneles en Roca	42
Tabla 2: Sistemas de Soporte Primario para Túneles de Suelo	43
Tabla 3: Propiedades mecánicas de la placa.....	45
Tabla 4: Propiedades de la sección por pulgada de ancho de placa, para plancha de acero de 2 pestañas	45
Tabla 5: Resistencia nominal de la costura	46
Tabla 6: Clasificación del estado del suelo de acuerdo a su.....	57
Tabla 7: Valores de PL, para una carga de trafico H20, en función de la altura del suelo	89
Tabla 8: Resumen de Excavación de Calicatas	99
Tabla 9: Coordenadas de los ensayos de Refracción Sísmica y MASW	101
Tabla 10: Valores de PL, para una carga de trafico H20.	110
Tabla 11: Presión transmitida por la cimentación del muro de contención.	111
Tabla 12: Resistencia a compresión túnel de 2300 mm de diámetro.....	119
Tabla 13: Resistencia a compresión túnel de 1500 mm de diámetro.....	119
Tabla 14: Resistencia de la conexión empernada, túnel D=2300mm	120
Tabla 15: Resistencia de la conexión empernada túnel de 1500 mm de diámetro	120
Tabla 16: Rigidez a la manipulación túnel de 2300 mm de diámetro.....	121
Tabla 17: Rigidez a la manipulación túnel de 1500 mm de diámetro.....	121
Tabla 18: Dimensionamiento mínimo de la planchas para los túneles liner	122
Tabla 19: Propiedades de los materiales del suelo.....	127
Tabla 20: Propiedades de los materiales en el terraplén	127
Tabla 21: Propiedades de la plancha de tunnel liner, para diametro de 1500mm y 2300mm.....	128
Tabla 22: Fases constructivas	130

Tabla 23: Determinación del multiplicador de carga para el análisis de la fuerza axial en el anillo de planchas para el tunnel liner.....	143
Tabla 24: Factor de seguridad y desplazamiento máximo	146
Tabla 25: Espesor de plancha y deformación inicial	147
Tabla 26: Espesor de plancha y deformación máxima.....	147
Tabla 27: Resumen de Los Ensayos Estándar de Laboratorio	148
Tabla 28: Parámetros geotécnicos para el diseño del Tunnel liner.....	149
Tabla 29: Resultado de la determinación de la carga viva.	150
Tabla 30: Resultado de la determinación de la carga muerta.	150
Tabla 31: Carga externa sobre la clave de los túneles.	150
Tabla 32: Resultados del análisis de la tensión ejercida del muro sobre la clave de los túneles.	151
Tabla 33: Carga externa sobre la clave de los túneles.	151
Tabla 34: Resultado de la resistencia a la conexión empernada.....	152
Tabla 35: Resultado a la resistencia a la compresión.....	153
Tabla 36: Resultado de resistencia a la manipulación e instalación.	153
Tabla 37: Resultado de la resistencia a compresión, túnel D=2300mm	155
Tabla 38: Resultado de la resistencia a compresión, túnel D=1500mm	155
Tabla 39: Resultado resistencia a la conexión empernada, túnel D=2300mm.....	156
Tabla 40: Resultado resistencia a la conexión empernada, túnel D=1500mm.....	156
Tabla 41: Resultado de la rigidez a la manipulación, túnel D=2300mm	157
Tabla 42: Resultado de la rigidez a la manipulación, túnel D=1500mm	157
Tabla 43: Resultado de dimensionamiento mínimo de las planchas liner	157
Tabla 44: Resultado del análisis de la fase I.....	158
Tabla 45: Resultado del análisis de la fase II	159
Tabla 46: Resultado del análisis de la fase III	159

Tabla 47: Resultado de la factoración de carga del camión de diseño C-2.....	160
Tabla 48: Resultado de F.S y desplazamientos máximos admisibles.	161
Tabla 49: Resultado LS 01	176
Tabla 50: Resultado LS 02	177
Tabla 51: Resultado LS 03	178
Tabla 52: Resultado LS 04	179
Tabla 53: Resultado LS 05	180
Tabla 54: Resumen de ensayos MASW (Profundidad de alcance de cada ensayos es 30.0m)...	181
Tabla 55: Resultado MASW 01	182
Tabla 56: Resultado MASW 02.....	182
Tabla 57: Resultado MASW 03.....	183
Tabla 58: Resultado MASW 04.....	183
Tabla 59: Resultado MASW 05.....	184

Índice de Figuras

Figura 1: Características del corrugado de las planchas metálicas.	44
Figura 2: Esquema de conexión.....	46
Figura 3: Equipo para ensayo del cono de arena	47
Figura 4: Determinación del peso unitario de campo con el método del cono de arena.....	49
Figura 5: Esquema de Ensayo de Refracción Sísmica	50
Figura 6: Análisis y Modelado por el Método MASW	51
Figura 7: Curva de flujo para la determinación del límite líquido de una arcilla limosa.....	52
Figura 8: Prueba de límite líquido: (a) dispositivo de límite líquido, (b) herramienta de ranurado, (c) porción de suelo antes de la prueba, (d) porción de suelo después de la prueba.....	53
Figura 9: Prueba de límite plástico.	54
Figura 10: Límites de Atterberg.....	55
Figura 11: Esquema del aparato de corte directo.....	58
Figura 12: Obtención de la envolvente de rotura y los parámetros de resistencia al corte (c' , ϕ') a partir de un ensayo de corte.	59
Figura 13: Célula endométrica.....	60
Figura 14: Evolución de la presión intersticial en un edómetro.	61
Figura 15: Proceso de disipación de presión intersticial y aumento de las tensiones efectivas. ...	62
Figura 16: Ejemplo de gráfico edométrico	63
Figura 17: Coeficiente C_d de túneles en el suelo (ϕ = ángulo de fricción)	66
Figura 18 : Relaciones Geométricas de la Curva de Gauss.....	70
Figura 19: Localización del Punto de Inflexión, según Peck 1969.....	72
Figura 20: Deformación del suelo (a) Desplazamiento radial uniforme (b) Desplazamiento radial de forma ovalada.....	73
Figura 21: Métodos numéricos y modelos para la ingeniería de túneles. Gnilsen, 1989)	75

Figura 22: a) Modelo de elemento viga con soporte elástico. b) Modelo de elementos finitos (Gnilsen, 1989)	77
Figura 23: fases cálculo del método de reducción de revestimiento.....	80
Figura 24: Fases para el cálculo del método de reducción de revestimiento.	81
Figura 25: Visualización del método de reducción de esfuerzos adoptando una curva de respuesta al suelo.....	82
Figura 26: Idea básica de un modelo elástico perfectamente plástico, gráfica tensión vs deformación.	84
Figura 27: Zona de estudio.	92
Figura 28: Inicio de excavación de calicatas y toma de muestras	99
Figura 29: Excavación y extracción de muestras.....	100
Figura 30: Ensayo de densidad de campo	100
Figura 31: Ubicación de ensayos de Refracción Sísmica y MASW.....	101
Figura 32: Ensayo de refracción sísmica y MASW	102
Figura 33: Curva de reducción del módulo de corte G, con la deformación.....	103
Figura 34: Perfil geotécnico	114
Figura 35: Interfaz de ingreso de datos	116
Figura 36: Configuración vehicular del camión C-2	117
Figura 37: Deformación de la malla del modelo en elementos finitos.	117
Figura 38: Puntos de control para el incremento de esfuerzos del camión C-2 en la clave del tunnel liner.	118
Figura 39: Incremento de esfuerzos en la clave del tunnel liner, debido a la carga del camión C-2 y sobrecarga del suelo por encima de la clave del túnel.	118
Figura 40: Geometría del modelo para la discretización de elementos finitos (Meibner H., 1996).	123
Figura 41: Modelo deformación plana.	124
Figura 42: Modelo numérico base, empleado para la simulación.	124

Figura 43: Modelamiento de elementos placa	126
Figura 44: Modelamiento del peso de las placas	126
Figura 45: Malla fina de elementos finitos del modelo para el tunnel liner de 1500 mm y 2300 mm de diámetro.	128
Figura 46: Tensiones iniciales de los suelos que circundan el tunnel liner de 1500 mm y 2300 mm de diámetro.	129
Figura 47: Incremento de esfuerzos verticales, condiciones iniciales sin carga. Esfuerzo Máximo vertical 2.05 Kg/cm ²	129
Figura 48: Ingreso Túnel. Desplazamiento total en la superficie 12.64 mm.	131
Figura 49: Ingreso Túnel. Se aprecia los desplazamientos en profundidad.	131
Figura 50: Salida túnel: Desplazamiento total en la superficie 12.64 mm.	132
Figura 51: Salida Túnel. Se aprecia los desplazamientos en profundidad.	132
Figura 52: Ingreso Tunnel liner. Se aprecia la malla deformada a causa del camión C-2.....	133
Figura 53: Ingreso Tunnel liner: Desplazamiento máximo en la superficie 14.30mm.	133
Figura 54: Ingreso Tunnel liner: Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 2300 mm igual a 10.24mm	134
Figura 55: Ingreso Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos en la superficie. Maximo desplazamiento 14.30mm.	134
Figura 56: Ingreso Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos a nivel de la Cimentación del muro de contención. Máximo desplazamiento 9.95mm.	135
Figura 57: Salida Tunnel liner. Se aprecia la malla deformada a causa del camión C-2.....	135
Figura 58: Salida Tunnel liner. Desplazamiento máximo en la superficie 13.22mm.	136
Figura 59: Salida Tunnel liner: Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 2300 mm igual a 9.37 mm	136
Figura 60: Salida Tunnel liner: Comportamiento de desplazamientos en la superficie Máximo desplazamiento 13.22 mm.	137
Figura 61: Salida Tunnel liner: Comportamiento de desplazamientos a nivel de la Cimentación del muro de contención. Máximo desplazamiento 8.89 mm.	137

Figura 62: Ingreso Tunnel liner. Se aprecia la malla deformada a causa del camión C-2 la influencia de carga sobre los túneles de 2300 mm y 1500 mm.	138
Figura 63: Ingreso Tunnel liner. Se aprecia la incidencia del desplazamiento del suelo en profundidad hasta la clave del tunnel liner. Desplazamiento máximo en la superficie 13.72 mm.	138
Figura 64: Ingreso Tunnel liner. Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 1500 mm igual a 8.43 mm	139
Figura 65: Ingreso Tunnel liner. Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 1500 mm y de 2300 mm	139
Figura 66: Ingreso Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos en la superficie. Máximo desplazamiento 13.72 mm	140
Figura 67: Ingreso Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos a nivel de la Cimentación del muro de contención. Máximo desplazamiento 9.69 mm.....	140
Figura 68: Salida Tunnel liner. Se aprecia la malla deformada a causa del camión C-2 y la influencia de carga sobre los túneles de 2300 mm y 1500 mm	141
Figura 69: Salida Tunnel liner. Se aprecia la incidencia del desplazamiento del suelo en profundidad hasta la clave del tunnel liner. Desplazamiento máximo en la superficie 13.11 mm	141
Figura 70: Salida Tunnel liner. Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 1500 mm y de 2300.	142
Figura 71: Salida Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos en la superficie. Máximo desplazamiento 13.11 mm	142
Figura 72: Salida Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos a nivel de la Cimentación del muro de contención. Máximo desplazamiento 8.76 mm	143
Figura 73: Representación de la fuerza axial en la carga última de 202.63 KN/m para el diámetro de 2300 mm	144
Figura 74: Representación de la fuerza axial en la carga última de 156.63 KN/m para el diámetro de 1500 mm	145
Figura 75: Representación de la fuerza axial en el equilibrio 138.09 KN/m para el diámetro de 2300 mm.....	145
Figura 76: Representación de la fuerza axial en el equilibrio 93.88 KN/m para el diámetro de 1500 mm	146

Figura 77: Zona de estudio	169
Figura 78: Inicio de exploración de campo	169
Figura 79: Toma de muestras	170
Figura 80: Ensayo de densidad de campo	170
Figura 81: Excavación de calicatas	171
Figura 82: Entibado de calicatas	171
Figura 83: Horno para secado de muestras.....	172
Figura 84: Instrumento para el ensayo de Limite Líquido	172
Figura 85: Ensayo de corte directo	173
Figura 86: Ensayo de corte directo	173
Figura 87: Secado de muestras - Ensayo de corte directo.....	174
Figura 88: Tesistas durante el inicio de ejecución de obra.....	174
Figura 89: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 1 y MASW 1	185
Figura 90: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 2 y MASW 2.....	185
Figura 91: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 3 y MASW 3	186
Figura 92: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 4 y MASW 4.....	186
Figura 93: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 5 y MASW 5	186

Índice de Anexos

Anexo A Panel Fotográfico.	169
Anexo B: Ensayo de Densidad de Campo.....	175
Anexo C: Ensayo de Refracción Sísmica.	176
Anexo D: Medición de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales (MASW)	181
Anexo E: Perfil Geotécnico.	185
Anexo F: Ensayos de Laboratorio.....	188

Símbolos Usados:

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials. (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes)
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
EPB	: Earth Pressure Balance. (Balance de Presión de Tierra).
RAE	: Real Academia Española.
ASTM	: American Society For Testing and Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales).
CISMID	: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
MASW	: Medición de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales.
MEF	: Método de Elemento Finito.
FDM	: Método de Diferencia Finita.
BEM	: Método de Elemento de Límite
DEM	: Método de Elemento Discreto
Av.	: Avenida.
HDPE	: High Density Polyethylene. (Polietileno de Alta Densidad).
HD	: Hierro Dúctil.
FS	: Factor de Seguridad.
G_o	: Cortante Máximo.
E_o	: Modulo de Elasticidad

Resumen.

A través de esta investigación se busca mostrar la realidad del diseño de túneles en zonas urbanas, donde muchas veces no se tiene en cuenta la interacción suelo – estructura, dejando de lado los asentamientos que estas pueden provocar. También se presenta un método de excavación manual, que se viene usando con mayor frecuencia en obras de gran envergadura en el Perú, como es el Tunnel Liner, lo cual ha brindado soluciones eficientes cuando se trata de realizar cruces de tuberías de diámetros considerables en vías urbanas, donde es imposible realizar excavaciones a cielo abierto. Los esfuerzos y deformaciones del suelo son factores más importantes a controlar, para garantizar una correcta relación suelo – estructura.

Como población de estudio se eligió el cruce de la Av. Faucett y Av. Benavidez, en el distrito de La Perla Callao, donde se realizó exploraciones geotécnicas. En el caso de estudio se plantea la instalación de dos túneles en paralelo de diámetro de 1500mm y 2300mm. Los cuales albergarán tuberías de HDPE 710mm y HD 1400mm respectivamente. Con el software Plaxis 2D, el cual aplica el MEF; se ha determinado el espesor de revestimiento de las placas de acero que conforman el tunnel liner. También se realizó un análisis de diseño, teniendo en cuenta la norma AASHTO.

Al realizar el análisis por el MEF considerando un espesor de plancha de 4mm para ambos túneles. Se obtuvo un máximo desplazamiento por aplastamiento del revestimiento de 8.43 mm, es decir el 0.56% del diámetro del túnel. Mientras que para el túnel de 2300 mm, el máximo desplazamiento por aplastamiento del revestimiento es de 10.24 mm, es decir el 0.45% del diámetro del túnel. Siendo la deformación máxima permisible para los túneles de 1500 mm y 2300 mm el 2.13% y 2.65% respectivamente. Mientras que al realizar el diseño por la norma ASSHTO, se obtuvo un espesor de 3mm para el túnel de 1500mm y 5mm para el túnel de 2300mm.

Palabras clave: Tunnel Liner, AASHTO, Revestimiento, Interacción, Esfuerzos, Deformaciones.

Abstract

This research seeks to show the reality of tunnel design in urban areas, where soil-structure interaction is often not taken into account. Leaving aside the settlements they can cause. A manual excavation method is also presented, which has been used more frequently in large-scale works in Peru, such as the Tunnel Liner. Which has provided efficient solutions, when it comes to crossings of pipes of considerable diameters in urban roads, where it is impossible to perform open pit excavations. The stresses and deformations of the soil are the most important factor to control, to ensure a correct soil-structure relationship.

With Plaxis 2D software, which applies the MEF; The coating thickness of the steel plates that make up the tunnel liner has been determined. For this, geotechnical explorations were carried out, at the crossroads of Av. Faucett and Av. Benavidez, in the district of La Perla Callao. Place where two parallel tunnels of 1500mm and 2300mm diameter will be located. Which will house HDPE 710mm and HD 1400mm pipes respectively. It is worth mentioning that an analysis was also carried out, taking into account only the AASHTO standard.

When performing the analysis by the MEF considering a plate thickness of 4mm for both tunnels. A maximum crush displacement of the coating of 8.43 mm was obtained, ie 0.56% of the tunnel diameter. While for the 2300 mm tunnel, the maximum crush displacement of the cladding is 10.24 mm, that is 0.45% of the tunnel diameter. The maximum allowable deformation for tunnels of 1500 mm and 2300 mm is 2.13% and 2.65% respectively. Whereas when making the design only by the AASHTO standard, a thickness of 3mm was obtained for the 1500mm tunnel and 5mm for the 2300mm tunnel.

Keywords: Tunnel Liner, AASHTO, Lining, Interaction, Efforts, Deformations.

Capítulo I. El problema.

1.1. Identificación del Problema.

La creciente complejidad para realizar proyectos de saneamiento de agua y desagüe, en áreas urbanas densamente pobladas, hace necesario recurrir a técnicas con métodos de excavación diferentes a los tradicionales. Entonces ante esta dificultad, es necesario impulsar proyectos de infraestructura subterráneos, sin generar la interrupción del funcionamiento de la ciudad ni provocar alteraciones en obras preexistentes en la superficie. Proyectos como lo es la Línea 2 del metro, que pasará por el distrito de la Perla Callao, lugar densamente poblado y donde es imposible realizar métodos de excavación tradicional, como por ejemplo una zanja a cielo abierto. Dentro de este proyecto de la Línea 2 del metro es necesario reubicar las tuberías de saneamiento, para así estar libre de interferencias al momento de ejecutar dicho proyecto. Es así que por la Av. Faucett cruzaran dos tuberías de agua potable una de diámetro de 710mm y la otra de 1500mm. Pero realizar un método de excavación común no es posible ya que esta vía no puede ser cerrada. La metodología del túnel revestido con placas de acero (comúnmente llamado Tunnel Liner) es un tipo de infraestructura subterránea que garantiza su construcción sin alterar el entorno. Al ser un método no destructivo, el tunnel liner es una solución eficiente para la innovación en estos tipos de proyectos.

Sin embargo, al ser esta metodología nueva en nuestro país, su aplicación se limita a procesos que no garantizan el diseño efectivo del revestimiento del túnel que permita predecir y controlar los efectos que puede provocar, las deformaciones del suelo, sobre las estructuras existentes en la superficie, durante y después de su construcción.

Es un gran desafío diseñar el revestimiento del túnel que garantice el control de los asentamientos y movimientos en la superficie del suelo causadas por el túnel, ya que si las

deformaciones son muy pronunciadas, los efectos sobre las estructuras existentes en la superficie del túnel tendrían serios daños, tales como asentamientos en exceso, rotura de estructura existente, llegando al extremo del colapso.

En la actualidad, los métodos de diseño del revestimiento para este tipo de túnel, tienen como base de diseño a las especificaciones de la norma American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en la sección 12.13 (año 2012). Esta norma, para realizar el análisis estructural se basa en la teoría de Marston y la ecuación de Boussinesq. Estos métodos son analíticos por lo tanto su aplicación se limita a considerar escasos factores, no garantizando un adecuado diseño ante problemas más complejos.

La teoría de Marston se usa para el cálculo de la carga muerta, considerando parámetros como el ángulo de fricción interna, la densidad y la altura del suelo que está sobre la clave del túnel y el diámetro del túnel. Todos estos parámetros se consideran constantes teniendo en cuenta que el tipo de suelo que está sobre la clave del túnel no cambia, suelo homogéneo e isotrópico. Esta teoría, comúnmente usada en el diseño de tuberías enterradas, menciona que “para el cálculo de las acciones producidas en una tubería instalada en zanja por el peso de las tierras, fue originalmente concebida para los tubos rígidos, en los cuales las deformaciones ante la acción de las cargas externas son despreciables” (Gálvez Cruz, 2011). Al considerar factores constantes (suelo homogéneo), la teoría se limita a casos muy simples ya que, generalmente los suelos presentan diferentes estratos y por ende los parámetros geotécnicos no serán constantes.

Otro aspecto deficiente del análisis de la teoría de Marston es que considera factores de seguridad muy altos, dando como resultado diseños muy conservadores, sobredimensionados que elevan el costo del proyecto.

La ecuación de Boussinesq es usada para el cálculo de la carga viva, este método se basa en el “cálculo de incrementos de esfuerzos, generados por una carga puntual aplicada en la superficie del suelo, un espacio infinitamente grande; considerando que en el punto donde se desea hallar los esfuerzos se encuentra en un medio homogéneo, elástico e isotrópico” (González Acosta, 2013). Este método también nos limita a considerar que el medio donde se emplaza el túnel sea homogéneo, y no es esa condición la que generalmente se encuentra en campo.

El (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014) (MTC), define a los métodos analíticos como inexactos, ya que estos no son capaces de modelar la realidad compleja de un túnel.

Entonces estos métodos no garantizan la elección del adecuado espesor del recubrimiento del túnel para controlar la deformación máxima que sufrirá la superficie del suelo.

Por lo tanto, ante la limitación del método de análisis que establece la norma AASHTO y ante la necesidad de conocer y controlar el comportamiento de las deformaciones del suelo, este tema de tesis busca realizar un aporte en la mejora del empleo de esta metodología del tunnel liner en nuestro país, realizando un análisis del comportamiento del suelo, mediante el modelo numérico de elementos finitos, para poder determinar el espesor adecuado del revestimiento del túnel que nos permita tener el control de los efectos de las deformaciones máximas.

1.2.Planteamiento del Problema

Teniendo en cuenta que el análisis y diseño del revestimiento del túnel está basado en la norma AASHTO, que limita a considerar escasos factores geotécnicos del suelo, ¿será suficiente considerar solo dichos factores para diseñar el revestimiento del túnel que garantice un comportamiento eficiente ante los efectos de deformaciones del suelo?, ¿esta normativa realiza un control predictivo de las deformaciones en el suelo subyacente a las infraestructuras en la

superficie?, ¿cuán vulnerables son las estructuras ubicadas en la superficie ante la existencia del túnel diseñado, sin considerar los efectos de las deformaciones del suelo? ¿Cuán importante es considerar el análisis por esfuerzos y deformaciones del suelo para el diseño del túnel? Estas y otras preguntas han motivado el desarrollo del presente trabajo, de manera que los profesionales tengan un documento de consulta, que permita integrar diferentes aspectos del suelo para obtener un diseño más eficiente de la estructura del tunnel liner.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar el espesor de revestimiento del tunnel liner en suelos urbanos, controlando los efectos de la interacción suelo-estructura, mediante el modelamiento geotécnico que aplica el método de elementos finitos.

1.3.2. Objetivos Específicos

Realizar un análisis de los esfuerzos en la interacción suelo-estructura mediante la metodología AASHTO.

Realizar un modelamiento geotécnico analizando los esfuerzos y deformaciones del sistema suelo-estructura, aplicando el software Plaxis 2D.

Analizar los resultados obtenidos mediante el modelamiento geotécnico con el software Plaxis 2D y el análisis por la metodología AASHTO.

1.4. Justificación

La metodología del túnel revestido con placas de acero, tunnel liner, es una solución eficaz a emplear en los diferentes problemas que surgen en la ejecución de grandes proyectos subterráneos que se vienen desarrollando en nuestro país.

Este tipo de metodología nos permite realizar trabajos, evitando la alteración del funcionamiento de la ciudad, reduciendo el tiempo de ejecución y el costo del proyecto. El tunnel liner comprende de una excavación manual dentro de un marco metálico de rigidez necesaria para mantener la estabilidad del suelo y las estructuras existentes en la superficie.

Al ser una infraestructura subterránea, para su diseño, es necesario conocer y controlar los efectos de la interacción suelo - estructura durante y después de su construcción. Estos efectos van a depender de las propiedades geotécnicas y mecánicas del suelo y de las placas de revestimiento.

Los esfuerzos y deformaciones del suelo son el factor más importante a controlar, para garantizar que la relación suelo – estructura pueda funcionar de manera correcta. Si las deformaciones fijadas en el diseño son excedidas por las halladas en la realidad, se tendría graves problemas.

Hoy en día, todo proyecto se realiza buscando cumplir con ciertas características importantes como son la seguridad y costo de ejecución.

Entonces ante la insuficiencia de los métodos de diseño actuales, que no garantizan el control predictivo de las deformaciones del suelo y los efectos del túnel sobre estructuras preexistentes, esta investigación busca proponer una metodología de diseño del espesor del recubrimiento del tunnel liner, empleando el software Plaxis que en su metodología considera modelos numéricos que incluye diversos factores incluyendo los esfuerzos y deformaciones del suelo.

Con los avances recientes en la capacidad de modelado numérico, el método de elementos finitos se ha convertido en una herramienta muy popular en la predicción de asentamientos de suelo inducidos por túneles. Actualmente la aplicación de modelos numéricos, es base para dar solución a diferentes problemas que debido a su complejidad no es posible afrontarlo solo con métodos analíticos.

Según el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014), el uso de modelos numéricos garantiza la posibilidad de modelar detalladamente diferentes estructuras, desde las simples a las más complejas, incluyendo estructuras adyacentes con distintos estratos geológicos, el comportamiento constitutivo complejo, cargas transitorias y dinámicas, y las secuencias de la construcción”.

(Díaz González & Ángel Reyes, s. f.) Mencionaron que, para reemplazar las teorías ya establecidas, es necesario que se continúe analizando y refutando la teoría actual con herramientas de análisis más sofisticadas que garanticen el criterio suficiente que sea como soporte para la toma de decisiones acertadas durante la ejecución de proyectos de construcción, sin provocar efectos negativos, tanto económicos y sociales, ni atentar contra la estabilidad durante la vida útil de los proyectos.

Es por esto que esta investigación busca dar una propuesta de mejora en el análisis y diseño en la metodología del tunnel liner, a través del control de los esfuerzos y deformaciones empleando modelamientos numéricos que aplica el software Plaxis 2D.

Capítulo II. Revisión de la Literatura/ Marco teórico.

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedente de Investigación 01

Autor: Sven Christian Moller

Año: 2006

Título: Tunnel Induced Settlements and Structural Forces in Linings

Objetivos:

Analizar los asentamientos inducidos por túneles y las fuerzas estructurales en revestimientos, considerando tanto los métodos elementales de análisis como el Método de los Elementos Finitos

Analizar la elección y la influencia de los sistemas estáticos y las condiciones de contorno para adaptarse a los diferentes métodos de tunelización garantizando un pronóstico de hundimiento y fuerzas de corte.

Metodología:

Para el análisis de los diferentes procedimientos de instalación y diferentes modelos constitutivos se presentan sobre la base de dos estudios de caso. El primer estudio de caso considera un túnel conducido convencionalmente y el segundo estudio de caso analiza un túnel de escudo de lodos. El análisis se centra en el empleo de métodos analíticos y métodos de elementos finitos en dos y tres dimensiones. En el modelado, además de considerar aspectos básicos de análisis de elementos finitos, se examina la importancia de modelar adecuadamente

el método de excavación elegido y la secuencia de apoyo, en especial las condiciones de contorno apropiadas que se especificarán en la cara y la pared del túnel.

Conclusiones:

Para los asentamientos, el canal de asentamiento gaussiano empírico después de PECK (1969) parece ser el único método utilizado frecuentemente en la práctica de ingeniería.

Las soluciones analíticas para evaluar las fuerzas estructurales en los revestimientos están restringidas por una serie de simplificaciones cruciales, como las secciones transversales circulares y el suelo homogéneo elástico (o elastoplástico). Por lo tanto, se pueden usar solo para el diseño preliminar del túnel.

Las aproximaciones en 2D de los túneles de protección se realizan sobre la base del método de contracción, el método de reducción de tensión o el método de presión de lechada. Se ha demostrado que el método de contracción del túnel conduce a resultados poco realistas de las deformaciones del terreno y las fuerzas del revestimiento. En cambio, el método de reducción de esfuerzos es más realista. Se propuso un enfoque de presión avanzada para túneles de protección, que se denominó método de presión de lechada y se encontró que ofrece predicciones más realistas para las deformaciones verticales y horizontales del terreno, así como las fuerzas estructurales.

Para los asentamientos de superficie en 3D y las fuerzas estructurales, se ha demostrado que es necesario excavar una considerable longitud de túnel para llegar a la solución de estado estable. Los momentos de flexión tienden a ser relativamente bajos. En cambio, las fuerzas normales son más importantes para el diseño del túnel. Los análisis de túneles con pantalla 3D aún están en debate, pero la tendencia es usar simulaciones de presión paso a paso.

2.1.2. Antecedente de Investigación 02

Autor: Peng Xie

Año: Mayo 2015

Título: Análisis en 2D de los Movimientos del Terreno Causados por la Excavación Mecanizada de Túneles con EPB

Objetivos:

El objetivo principal de la tesis es el estudio de los movimientos del terreno en superficie y en profundidad que se genera cuando excavamos un túnel con tuneladora en suelos deltaicos. Además se validarán los métodos empíricos existentes en la literatura sobre movimientos, y se obtendrán los parámetros de caracterización del suelo deltaico. Se estudiarán los movimientos del terreno provocados por la excavación del túnel de la línea 9 en Barcelona.

Metodología:

Primero se describe el método de excavación con tuneladora del tipo EPB. Luego se hace un repaso de los métodos empíricos existentes en la literatura sobre la estimación de los movimientos en el terreno tanto en superficie como en profundidad. Estos métodos se emplearán para un caso de una excavación real, el caso del metro de la Línea 9, analizando las cubetas de asiento transversal resultantes y ajustando los datos registrados por la instrumentación de campo a la distribución Gaussiana. Este ajuste se realiza de la distribución Gaussian a los datos de campo se realiza mediante mínimos cuadrados.

Una vez analizados los datos de campo se construye un modelo de la excavación del túnel de iguales características tanto en geometría, como en geología atravesada de línea 9 mediante

el programa de elementos finitos PLAXIS 2D V 9.0. Mediante este programa se hará un análisis de sensibilidad de algunos de los parámetros de entrada en el modelo de la excavación, además del estudio de los modelos constitutivos existentes con la finalidad de calibrar el modelo y que los datos reproduzcan en la mejor medida posible el caso estudiado.

Finalmente se comparan los resultados de las cubetas transversales de asiento proporcionados por los datos de campo obtenidas mediante la distribución Gaussiana como los movimientos verticales proporcionados por los extensómetros, en superficie y en profundidad con los resultados proporcionadas por el modelo de Plaxis 2D.

Conclusiones:

Para analizar las deformaciones del suelo debido a la excavación del túnel se ha empleado, de los diferentes modelos constitutivos que dispone el programa Plaxis 2D, el modelo Small Hardening soil (SHSM), al comparar los resultados del modelado con los datos de campo, resultan muy similares.

Se ha simulado una excavación según el método conocido con el nombre de Volumen Contraction y el método de Stress Reduction y se ha observado que el método de Stress Reduction simula mejor el proceso de excavación.

Una vez elegidos el modelo constitutivo y el método de simulación, se ha realizado un estudio de sensibilidad de varios parámetros de entrada del programa Plaxis como: (1) la dimensión del modelo, (2) la influencia del refinado, (3) el estado de tensión inicial (variación del parámetro K_0) y (4) la influencia de la interface.

Respecto a la dimensión del modelo, se estudiaron 20 casos, y se concluyó que el caso $h=20\text{m}$ y $w=123\text{m}$ era el más adecuado dado que los movimientos verticales a una distancia del centro de excavación eran cero.

Con respecto al refinado de malla, para ahorrar en el coste computacional y obtener un buen resultado de cálculo, determinamos que el refinado Fino es la mejor opción de refinado general de la malla.

Para el análisis del estado de tensión inicial, se estudiaron 3 expresiones en función del grado de consolidación del suelo. Se analizaron varios casos considerando diferentes valores del ángulo de fricción, para un suelo normalmente consolidado, y se obtuvo que, al considerar un solo valor de ángulo de fricción para todos los materiales, el asiento vertical en la superficie era menor que en el caso de considerar un ángulo de fricción diferente para cada material.

Respecto a la influencia de la interface, se cambia el valor de R_{inter} y se observa que el valor de asiento vertical aumenta a medida que disminuimos la rigidez de la interfase suelo-estructura.

2.1.3. Antecedente de Investigación 03

Autor: Victor Abner Alcahuamán Villanueva

Año: Octubre 2016

Título: Análisis de Túneles Excavados con Tuneladora Mediante el Programa Plaxis

Objetivos:

Evaluar de qué manera influye las condiciones de contorno y los parámetros de excavación en la modelización de los movimientos verticales en superficie en dos dimensiones utilizando el programa Plaxis 2D.

Analizar la influencia de los parámetros de excavación en la modelización de los movimientos verticales en superficie en tres dimensiones utilizando el programa Plaxis 3D.

Aplicar a un caso de Estudio: “Construcción de la Línea 2 del metro de Lima, Etapa 1B, progresiva km 12+700”, los parámetros evaluados y comparar los resultados obtenidos.

Metodología

Primero se hizo una revisión bibliográfica acerca de las características de las tuneladoras, los métodos de predicción de asentos, así como información teórica de solución de problemas de asentamiento de terrenos mediante los métodos numéricos. También se realizó la revisión de guías y manuales para familiarizarnos con la metodología de modelización con el programa Plaxis 2D y 3D. Luego se planteó el problema en 2D y 3D utilizando el software mencionado, se hizo la evaluación en diferentes casos utilizando parámetros que más se ajustan a un caso real. Finalmente en la parte de la aplicación en el caso de estudio, “Construcción de la Línea 2 del Metro de Lima, Etapa 1B progresiva km 12+700” se hizo el modelado analizando los resultados correspondientes a la distribución de tensiones, deformaciones inducidas y las sollicitaciones de las dovelas.

Conclusiones:

Al aplicar los parámetros necesarios, en el caso de Estudio, y analizar los resultados de los modelos Plaxis 2D, Plaxis 3D y FLAC 3D, se han obtenido los principales resultados en dos y

tres dimensiones relacionados a las tensiones verticales en el terreno, movimientos verticales y horizontales, y solicitaciones de la dovelas.

En relación las tensiones verticales, se ha observado que la modelación mediante Plaxis 2D y 3D presentan resultados similares; mientras que de la comparación con el FLAC 3D, se obtiene la misma configuración con valores muy próximos entre sí.

La cubeta de asentamientos verticales y la distribución de asientos en la sección transversal en los modelos de Plaxis 2D y 3D, tienen una configuración muy idéntica. También los resultados de la curva de movimientos horizontales en la superficie del terreno, obtenidos por estos modelos, resultan ser muy similares.

Al comparar los modelos Plaxis 2D, 3D y el FLAC 3D, se deduce que los movimientos verticales y horizontales en la superficie del terreno presentan valores similares, aunque en general los movimientos obtenidos con Plaxis son mayores. Los esfuerzos obtenidos con Plaxis también fueron algo mayores que los obtenidos con FLAC. Las diferencias entre el modelado en Plaxis y el FLAC radica en el empleo de los modelos constitutivos de los materiales y en la forma de simular la construcción del anillo de dovelas.

2.1.4. Antecedente de Investigación 04

Autor: Shabna P S, Dr. N Sankar

Año: Abril 2016

Título: Numerical Analysis of Shallow Tunnels in Soft Ground Using Plaxis 2D

Objetivos:

Establecer un modelo de suelo apropiado para la predicción del perfil de asentamiento debido a la construcción de un único túnel poco profundo en un terreno blando.

Metodología:

El desarrollo de esta investigación comienza con la recopilación de datos de estudios de casos reportados.

Utilizando los datos de laboratorio y la observación de campo que justifican el rango de parámetros asignados en el análisis.

En primer lugar, establecimiento de modelo conceptual según los datos recogidos.

Determinación del uso del método numérico de elementos finitos por el programa PLAXIS 2D, ya que es adecuado para el estudio.

Justificando los parámetros de entrada en el programa de acuerdo a los datos recolectados.

Antes del análisis computacional, el programa PLAXIS 2D se verifica comparando el método numérico con el método analítico.

El análisis numérico se llevará a cabo después de verificar que el programa es confiable.

Conclusiones:

Como se mencionó en las secciones anteriores, en proyectos de excavación de túneles y mantenimiento subterráneo, la redistribución de esfuerzos y las deformaciones del suelo debidas a la excavación de túneles no pueden ser despreciables. De hecho, los programas en construcción y etapa posterior a la construcción se ven afectados por este asunto. La variación de la tensión alrededor del túnel es importante en la selección del revestimiento de hormigón del túnel o los tipos y la cantidad de fuerzas generadas en los soportes. En general, los resultados

de esta investigación mostraron la capacidad de un análisis de elementos finitos elastoplásticos en 2D para evaluar las deformaciones inducidas en suelos residuales mediante excavaciones en túneles poco profundos. Los elementos clave en tales simulaciones son:

El uso de modelos constitutivos avanzados, calibrados utilizando los resultados de programas de pruebas de laboratorio cuidadosos.

El uso de un código de elemento finito capaz de acomodar problemas en las etapas de construcción del túnel.

Las deformaciones del suelo y los efectos de la construcción se determinan mediante el empleo del modelo numérico. La pérdida de tierra es un efecto de parámetro importante en el rendimiento del sistema del túnel del metro. Un modelo numérico 2D es aplicable para analizar y predecir el rendimiento detallado del sistema de túnel. El área de la sección transversal ocupada por el revestimiento final del túnel siempre es menor que el área de suelo excavado. Aunque se apliquen diferentes métodos para llenar este vacío, es difícil evitar que se generen redistribuciones de esfuerzos y deformaciones en el suelo como efectos del proceso constructivo del mismo. Para evitar daños a las estructuras existentes en la superficie del túnel, es de vital importancia predecir estos efectos para manejarlos y controlarlos aplicando medidas prudentes. Estas predicciones pueden ser conocidas aplicando el método numérico de elementos finitos.

2.1.5. Antecedente de Investigación 05.

Autor: Díaz González H., Ángel Reyes G.

Título: Análisis comparativo de la Teoría de Marston para Tuberías Enterradas y la Modelación Numérica con Elementos Finitos.

Objetivos:

Estimar el grado de conservatismo de la teoría de Marston, aplicada en tuberías rígidas enterradas. Teoría con la que se viene trabajando desde hace muchos años hasta la actualidad.

Analizar un problema tipo aplicando la teoría de Marston, comparado con un modelo matemático de elementos finitos a través del software Plaxis.

Metodología:

Para realizar el análisis se plantea un problema tipo tomando como base el caso Marston en condición zanja, éste fue analizado utilizando la teoría tradicional del mismo autor considerando los siguientes parámetros de entrada: diámetro externo del tubo $B_c=1.00\text{m}$, relación $B_d/B_c=1.60$ (este valor puede considerarse como el punto medio entre los valores recomendados para tuberías flexibles y rígidas). Se asumió paredes indeformables y un modelo de instalación con un factor de carga equivalente a un solo material de relleno, fundación rígida y la tubería atracada sobre la misma con un pequeño ángulo de incidencia.

Paralelamente se modeló el mismo caso en el programa Plaxis, para ello se utilizó un ángulo $\emptyset = 30$ en el contacto entre las paredes y el relleno de la zanja. Se utilizó fricción completa en la interfaz de la tubería con el relleno circundante.

Conclusiones:

Durante el análisis se pudo observar una gran diferencia en el modo de aplicación de las cargas verticales. Marston define un plano crítico (horizontal y tangente a la corona del tubo). Para tuberías rígidas se usa el plano crítico rígido (PCR), el cual actúa en todo el ancho de la zanja y para tuberías flexibles usa el plano crítico flexible (PCF), el cual solo actúa en el ancho

de la tubería. Por el contrario el Plaxis aplica una “carga perimetral”, la cual actúa directamente sobre el hemisferio superior del anillo.

2.2.Marco Teórico

2.2.1. El túnel.

Se dice que los túneles son pasajes subterráneos construidos para comunicar directamente dos puntos, pasando por debajo de obstáculos tales como una ciudad, una montaña, un río, el propio mar, etc. (De La Rosa Arenas, 2015)

La Real Academia Española (RAE), define un túnel como una vía subterránea abierta artificialmente para el paso de personas y vehículos. Instalación cubierta y alargada que comunica dos puntos y sirve para distintos fines.

2.2.2. Clasificación de Túneles

(Cuenca Alfaro, 2009), en su tesis de maestría clasifica los túneles de la siguiente manera:

2.2.2.1. *Según su Servicio.*

- a) **Carreteros.** Como su mismo nombre lo dice, son túneles construidos para el paso de carreteras.
- b) **Ferrovianos.** Construidos en el paso de vías férreas. Estos túneles en su mayoría de veces atraviesan formaciones montañosas.
- c) **Metro.** Construido debajo de las grandes ciudades.
- d) **Agua potable y alcantarillado.** Construidos para pasar tuberías de diámetro considerable o cuando no es posible realizar zanjas a cielo abierto.
- e) **Peatonales.** Suelen ser de corta longitud, usado para el cruce de personas.

2.2.2.2. *Según su Localización.*

- a) **Bajo el agua.** Usado en el cruce de ríos y mares.
- b) **De montaña.** Usados en el cruce de montañas.

c) **Subterráneos.** Emplazados a la altura del subsuelo.

2.2.2.3. *Según la Geología.*

a) **Túneles en roca.** Túneles construidos en mantos rocosos.

b) **Túneles en suelo.** Túneles construidos en suelos más blandos que la roca.

c) **Túneles con frente mixto.** Cuando el frente de excavación presenta estratigrafía de roca y suelos.

2.2.3. Tipos de Revestimiento

El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Illinois en un estudio realizado para la Oficina de Transporte Terrestre de Alta Velocidad, Departamento de Transporte de los EE. UU, identifica de forma general dos tipos de revestimiento: Revestimiento Primario, soporte principal que lleva la mayor parte de la carga o la carga completa; también indica que este sistema de soporte primario debe proporcionar el soporte inicial para la apertura, controlar las deformaciones dentro del túnel y minimizar las perturbaciones en las capas adyacentes y superpuestas estructuras. Del Revestimiento Secundario indica que es cualquier forro que cubre el sistema de soporte primario, el revestimiento secundario suele ser no estructural por lo que en algunos proyectos no es considerado, basta con que el revestimiento primario sea resistente a la corrosión para que el revestimiento secundario sea eliminado.

Resaltaremos la clasificación del Revestimiento Primario según el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Illinois.

2.2.3.1. Tipos de Sistemas de Revestimiento Primario

2.2.3.1.1. Túneles de Roca.

Dentro de estos túneles se identifican tres tipos de revestimiento: Rock Bolts traducido como pernos de roca o pernos de anclaje, Steel Sets que se traduce como conjunto de aceros y el Shotcrete conocido como concreto lanzado. Para esto se nos brinda una tabla teniendo en cuenta la aplicabilidad, en acorde con el tipo de suelo.

Tabla 1: Uso de Sistemas de Soporte Primario para Túneles en Roca

Tipo de Soporte	Calidad de Roca				Observaciones
	Buena	Regular	Pobre	Muy pobre	
Rock bolts	Si	Si	?	No	Difícil o imposible de obtener anclaje en roca pobre y muy pobre
Shotcrete	Si	Si	Si	?	Puede no requerir un revestimiento secundario para la protección contra la corrosión. Los desarrollos futuros son prometedores. Se requiere soporte suplementario en roca de peor calidad.
Steel sets	Si	Si	Si	Si	Por lo general, es más caro, pero a veces es el único sistema que se puede usar.

Fuente: (Civil Engineering Department of the University of Illinois, s. f.)

2.2.3.1.2. Túneles de Suelo.

Los túneles de suelo a menudo tienen revestimientos secundarios, pero los túneles blindados se han construido tradicionalmente sin un revestimiento secundario porque el sistema de soporte primario era de hierro fundido y resistente a la corrosión. Los túneles de blindaje más modernos, revestidos con segmentos de acero recubiertos o de concreto, también son resistentes a la corrosión y no requieren revestimiento secundario. (Civil Engineering Department of the University of Illinois, s. f., p.27)

La siguiente tabla presenta el ámbito de aplicación de diferentes tipos de sistemas de soporte teniendo en cuenta el tipo de suelo.

Tabla 2: Sistemas de Soporte Primario para Túneles de Suelo

Tipos de Sistema	Observaciones
Segmentos de acero atornillados	Generalmente se usa en condiciones de suelos pobres. Demasiado caro en otras condiciones del suelo. Se han recubierto con una película resistente a la corrosión y se han utilizado sin un forro secundario.
Segmentos de hierro fundido	A menudo se usa para túneles de escudo protector en suelo blando. Demasiado caro en otras condiciones del suelo. No requiere un revestimiento secundario para la protección contra la corrosión.
Segmentos de hormigón atornillados	Todavía no se usa en los Estados Unidos. Aplicable a las malas condiciones del suelo. No requiere un revestimiento secundario para la protección contra la corrosión.
Segmentos de concreto desatornillado	Se usa solo en suelos con alto tiempo de consolidación, como arcilla muy rígida. No requiere un revestimiento secundario para la protección contra la corrosión.
Nervadura de acero y revestimiento de madera o con placas de revestimiento	Es versátil bajo la mayoría de condiciones de suelo excepto en arena fluida y arcilla con alta plasticidad
Placas de revestimiento sin nervadura de acero	Se usa solo para túneles de pequeño diámetro.
Shotcrete	Útil en suelos que tienen suficiente tiempo de consolidación. No puede soportar el empuje del soporte. No requiere revestimiento secundario
Concreto colocado en el lugar	Se usa solo para túneles de pequeño diámetro en buenas condiciones de suelo

Fuente: (Civil Engineering Department of the University of Illinois, s. f.)

2.2.4. Planchas de Acero Corrugado (Planchas Liner)

Las planchas de revestimiento, cuentan con un elevado módulo de elasticidad, con la finalidad de que la estructura formada tenga una alta resistencia y pueda soportar las cargas puntuales y/o cargas distribuidas que se puedan generar durante la construcción, o que se puedan presentar al momento de la construcción como fallas del terreno, presencia de nivel freático, desmoronamientos, presiones del enlechado, etc. El suelo que rodea a la estructura ayudará a mantener la sección circular del tunnel liner.

La capacidad portante de las planchas de revestimiento se basa en la capacidad de deformarse bajo la carga de manera que la restricción lateral del suelo reduce cualquier deformación adicional. La deformación tiende así a igualar presiones radiales y a producir una carga sobre el revestimiento en forma de anillo de compresión (de similar a lo que sucede con las alcantarillas de acero corrugado). La deformación del túnel depende considerablemente de la cantidad de sobre excavación y se ve afectada por la demora en la colocación o por la colocación inadecuada del relleno.

La corruga que caracteriza a estas planchas, cuenta con una distancia entre pestañas corresponde a 475.2mm y la profundidad de la onda a 44.5mm.

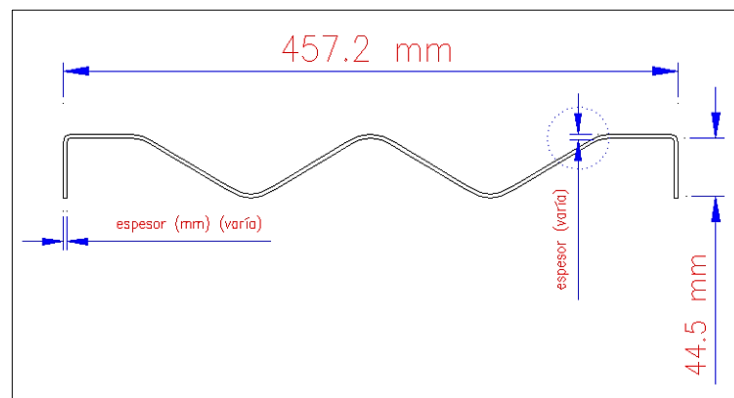


Figura 1: Características del corrugado de las planchas metálicas.

Los espesores de estas planchas pueden variar dependiendo de los requerimientos del proyecto y ser de 2.5 mm, 3.0 mm, 3.5 mm, 4.0 mm, 4.5 mm, 5.0 mm, 5.5 mm y llegar hasta 6.0 mm. El metal base de las planchas de revestimiento cumplen con la norma ASTM A-1011/A1011M-10 (norma que sustituye a la ASTM A-569, retirada el año 2000) y el galvanizado en caliente cumple con las normas ASTM A-123 y ASTM A-90. Mientras que el diámetro mínimo recomendado es de 1.40m. Se recomienda este diámetro por la facilidad de trabajabilidad al momento de la ejecución.

Las propiedades mecánicas de las planchas, así como de la sección transversal y la mínima resistencia de las costuras longitudinales para las placas de acero para revestimiento de los túneles debe cumplir con:

Tabla 3: Propiedades mecánicas de la placa

Resistencia a la Fluencia, min (kg/mm²)	Resistencia a la Tracción, min. (Kg/mm²)	Alargamiento 50 mm (%)	Módulo de Elasticidad del acero (Kg/cm²)
19,68	29,58	30	2100000

Fuente: (AASHTO, 2012)

Tabla 4: Propiedades de la sección por pulgada de ancho de placa, para plancha de acero de 2 pestañas

Thicknees (in)	Effective Area (in²/in)	Moment of Inertia (in⁴/in)
0.075	0.096	0.034
0.105	0.135	0.049
0.135	0.174	0.064
0.164	0.213	0.079
0.179	0.233	0.087
0.209	0.272	0.103
0.239	0.312	0.118

Fuente: (AASHTO, 2012)

Tabla 5: Resistencia nominal de la costura

Ultimate Seam Streangth of Liner Plates		
Plate Thickness (in)	Ultimate Strength (kips/ft)	
	2-Flange	4-Flange
0.075	20.0	-
0.105	30.0	26.0
0.135	47.0	43.0
0.164	55.0	50.0
0.179	62.0	54.0
0.209	87.0	67.0
0.239	92.0	81.0
0.313	-	115.0
0.375	-	119.0

Fuente: (AASHTO, 2012)

Los accesorios de montaje se rigen a lo establecido por la norma ASTM, dentro de los accesorios que se utilizan estan: pernos, tuercas, golillas y clips. A continuación se muestra un esquema de conexión.

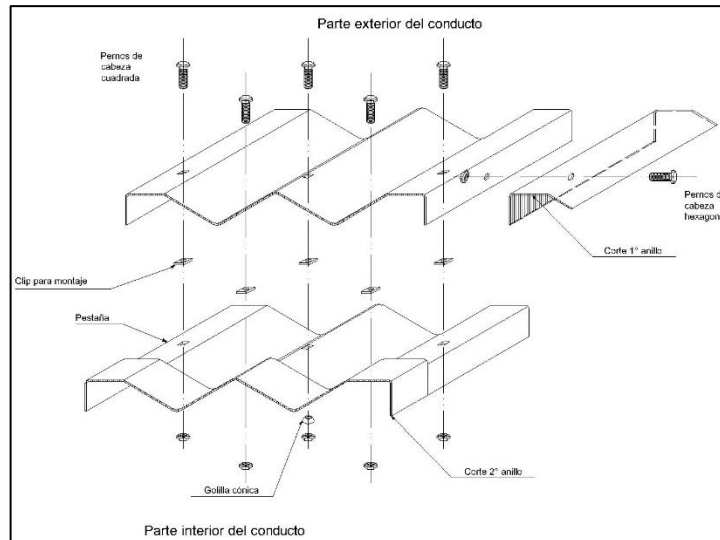


Figura 2: Esquema de conexión

2.2.5. Estudios Previos al Diseño de Tunnel liner

2.2.5.1. Caracterización del Suelo para Diseño del Tunnel liner

2.2.5.1.1. Exploración de Campo

i. Densidad de Campo (ASTM D1556)

Según el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), este método es muy utilizado para determinar la densidad de suelos compactados utilizados en la construcción de terraplenes de tierra, rellenos de carreteras y estructuras de relleno. Es de uso común para garantizar la compactación de suelos a un cierto porcentaje de la densidad máxima la cual es determinada aplicando un método de ensayo estándar en el laboratorio. Este método no debe aplicarse en suelos blandos, fáciles de pulverizar o que estén con exceso de humedad. (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), 1992)

Se aplicará el método del cono de arena, tendremos como ejemplo el mismo que propone (Braja M, 2015), en su libro Fundamentos de Ingeniería Geotecnia. Donde explica lo siguiente:



Figura 3: Equipo para ensayo del cono de arena

Fuente: (Braja M, 2015)

- El dispositivo de cono de arena consiste en un vaso o jarra de plástico con un cono de metal unido a su parte superior (figura 1). La jarra se llena con arena de Ottawa seca muy uniforme y se determina el peso (W_1) de la jarra más el cono y la arena que llena la jarra. En el campo, se excava un pequeño agujero (de 10 a 15cm de profundidad), en la zona donde el suelo ha sido compactado. Si se determina el peso de la humedad del suelo excavado desde el agujero (W_2) y se conoce el contenido de humedad de la tierra excavada, el peso seco del suelo (W_3) está dado por.

$$W_3 = \frac{W_2}{1 + \frac{w(100\%)}{100}}$$

Dónde: w = contenido de humedad

- Después de excavar del agujero, el cono con la jarra llena de arena unida a él se invierte y se coloca sobre el orificio (figura 2). Se deja que la arena fluya fuera de la jarra dentro del orificio y el cono. Una vez que el orificio y el cono están llenos, se determina el peso de la jarra, el cono y la arena restante en la jarra (W_4), por lo que:

$$W_5 = W_1 - W_4$$

Dónde: W_5 = peso de arena que llena el agujero y el cono.

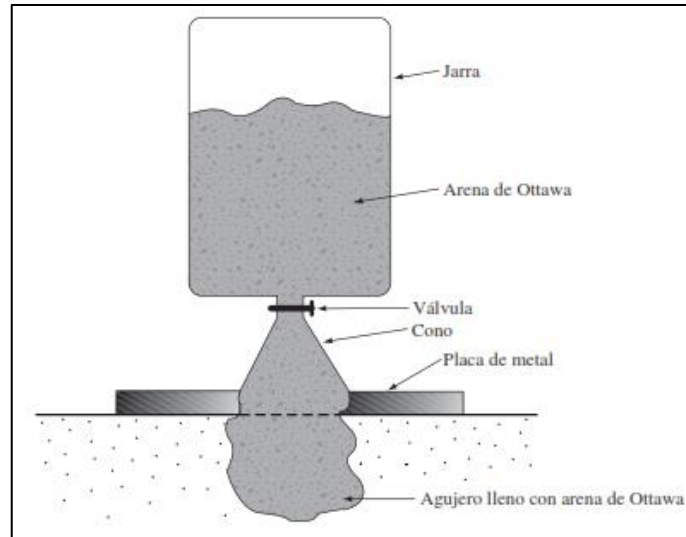


Figura 4: Determinación del peso unitario de campo con el método del cono de arena

Fuente: (Braja M, 2015)

- El volumen del orificio excavado ahora se puede determinar como:

$$V = \frac{W_5 - W_c}{\gamma_{d(\text{arena})}}$$

Dónde: W_c = peso de la arena para llenar solo el cono.

$\gamma_{d(\text{arena})}$ = peso unitario en seco de la arena de Ottawa utilizada

- Los valores W_c y $\gamma_{d(\text{arena})}$ se determina a partir de la calibración realizada en el laboratorio.

El peso unitario seco de compactación hecho en el campo ahora se puede determinar como:

$$\gamma_d = \frac{\text{peso seco del suelo excavado del agujero}}{\text{volumen del agujero}} = \frac{W_3}{V}$$

ii. Refracción Sísmica (ASTM D5777).

Es un ensayo de exploración geofísica, método indirecto de exploración geotécnica, que nos permite determinar los espesores de los diferentes estratos del subsuelo, perfiles longitudinales, teniendo como base las velocidades de la onda de compresión (ondas P)

El método de refracción sísmica consiste en registrar el tiempo de llegada de los primeros impulsos desde un disparo a un conjunto de detectores (geófonos) distribuidos en la superficie. Es decir, medir los tiempos de viaje de las ondas de compresión (ondas P) generadas por un golpe de impacto causado por una comba de 25 lb. (US Army Corps of Engineers, 1995)

A continuación se presenta un esquema del ensayo.

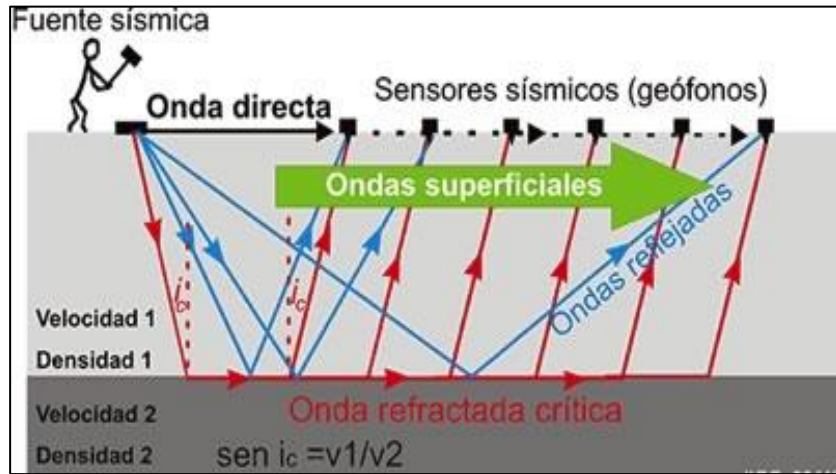


Figura 5: Esquema de Ensayo de Refracción Sísmica

Fuente: (IGC 2011)

iii. Ensayo Medición de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales (MASW)

Respalda por la norma ASTM D7400. Según (US Army Corps of Engineers, 1995), una amplia variedad de ondas sísmicas se propagan a lo largo de la superficie de la tierra. Se llaman ondas de superficie porque su amplitud disminuye exponencialmente al aumentar la profundidad. La onda de Rayleigh es importante en los estudios de ingeniería debido a su simplicidad y debido a la estrecha relación de su velocidad con la velocidad de la onda de corte para los materiales de la tierra. Como la mayoría de los materiales de la tierra tienen relaciones de Poisson en el rango de 0.25 a 0.48, la aproximación de las velocidades de onda de Rayleigh como velocidades de onda de corte causa menos de un error de 10 por ciento.

Este ensayo permite elaborar perfiles unidimensionales de velocidades de ondas de corte (V_s), hasta una profundidad de alcance de 30m. El método de ensayo consiste en medir el tiempo de viaje de estas ondas generadas por un golpe de impacto producidas por una comba. Para este método se emplean geófonos de 4.5 Hz de frecuencia, además los puntos de shot se ubican a 0,2 y 0,4 L a los extremos de la línea.

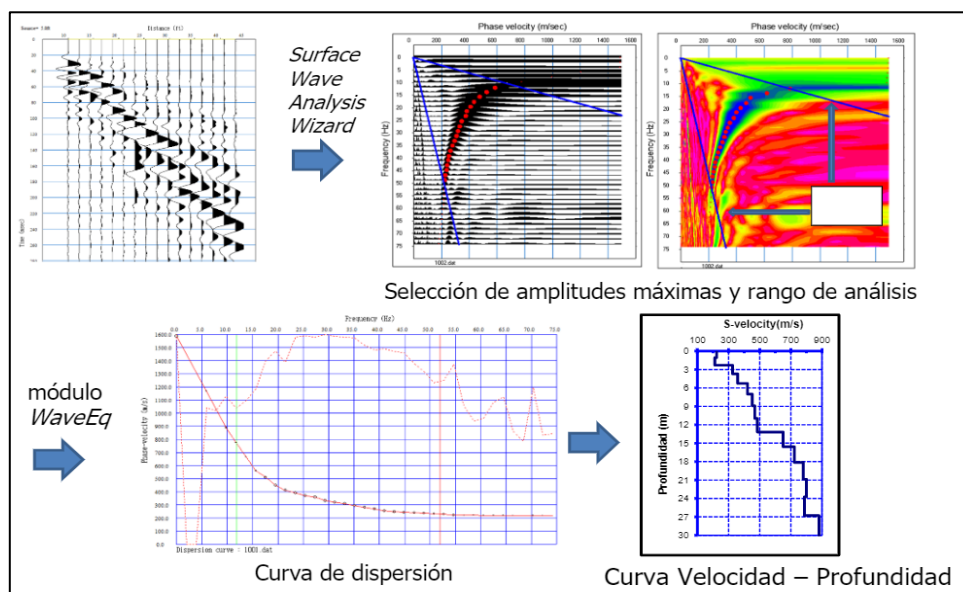


Figura 6: Análisis y Modelado por el Método MASW

Fuente: (Alva Hurtado, 2013)

2.2.5.1.2. Ensayo de Laboratorio.

i. Análisis Granulométrico por Tamizado. (ASTM D-422)

Según la American Society For Testing and Materials (ASTM), “este ensayo nos sirve para conocer la distribución cuantitativa de tamaños de las partículas del suelo”.

Para partículas de tamaños mayores a $75 \mu\text{m}$ (retenidas en la malla 200) se emplea el método de tamizado, mientras que para partículas de tamaños menores a $75 \mu\text{m}$ es, se emplea un proceso de sedimentación usando un hidrómetro para obtener los datos necesarios (American Society For Testing and Materials, 1998)

ii. **Límites de Consistencia (ASTM D-4318).**

Estos métodos de ensayo según la ASTM “son para la determinación del límite líquido, límite plástico, y el índice de plasticidad de los suelos”.

Este ensayo también conocido como límites Atterberg (por el científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg), este científico desarrollo un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad (Braja M, 2015), quien en un principio definió seis tipos de límites de consistencia. “En la actualidad, el término se refiere sólo al límite líquido, límite plástico, y en algunas referencias, el límite de la contracción” (American Society For Testing and Materials, 2005)

Los conceptos que a continuación se presentan, son definidos en la norma ASTM D4318:

- a) **Consistencia.-** Relativa facilidad para la deformación de un suelo.
- b) **Límite Líquido (LL).-** Es el porcentaje de agua que define que por debajo de este valor el suelo se comporta como un material plástico. El instrumento usado para el cálculo de este límite, es la copa de Casagrande (figura 6).

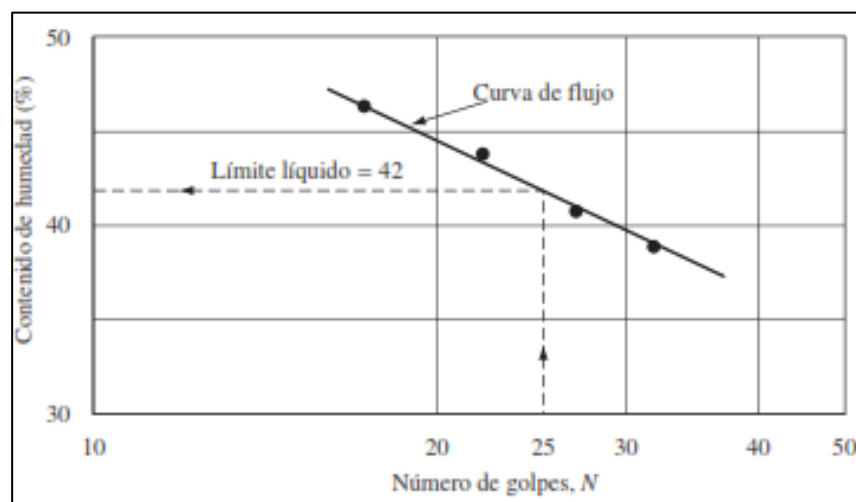


Figura 7: Curva de flujo para la determinación del límite líquido de una arcilla limosa.

Fuente: (Braja M, 2015)

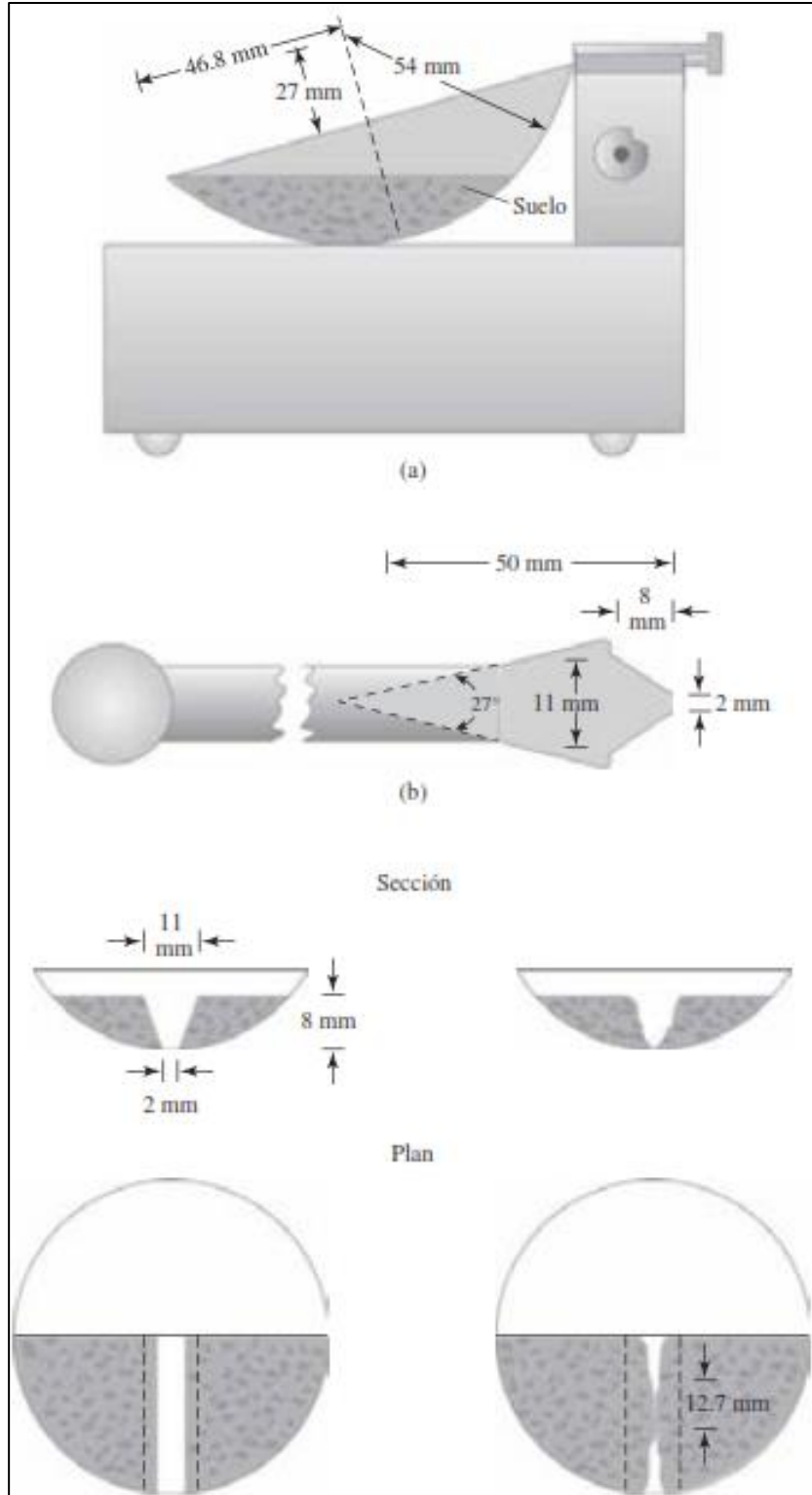


Figura 8: Prueba de límite líquido: (a) dispositivo de límite líquido, (b) herramienta de ranurado, (c) porción de suelo antes de la prueba, (d) porción de suelo después de la prueba.

Fuente: (Braja M, 2015)

- c) Límite Plástico (LP).- Es el porcentaje de agua que define, que por debajo de este valor el suelo se comporta como un material no plástico. Es decir es el porcentaje, en el que el suelo al enrollarse en hilos de 3.2mm de diámetro se desmorona.



Figura 9: Prueba de límite plástico.

Fuente: (Braja M, 2015)

- d) Índice de Plasticidad (IP).- Es el intervalo del porcentaje de agua en el cual el suelo tiene un comportamiento plástico. El valor se determina realizando la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

(Braja M, 2015), menciona sobre la consistencia del suelo, que cuando los minerales de arcilla están presentes en el suelo de grano fino, el suelo se puede remover en presencia de algo de humedad sin que se desmorone. Esta naturaleza cohesiva se debe al agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla. Si el contenido de humedad es muy bajo, el suelo se comportará lo más cercano a un sólido quebradizo. Mientras que si el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Es así que el Dr. Braja Das concluye que, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo

puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido, como se muestra en la siguiente figura.

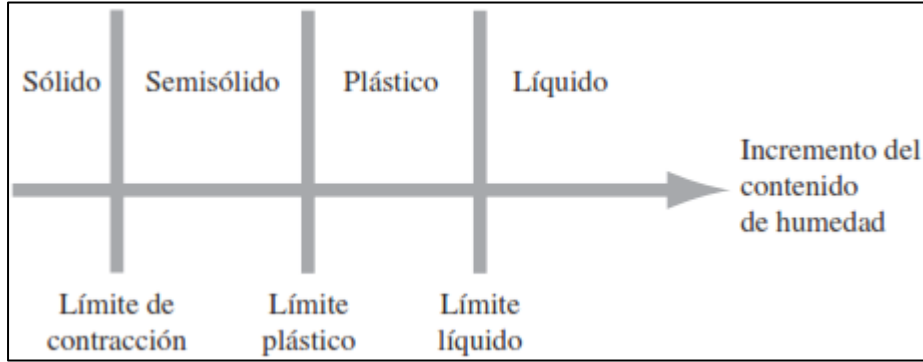


Figura 10: Límites de Atterberg

Fuente: (Braja M, 2015)

iii. Contenido de Humedad (ASTM D-2216).

La ASTM define como contenido de humedad, “al porcentaje de la masa del agua contenida en los poros, o agua libre, en una masa dada de material con respecto a la masa del material sólido”

La ASTM brinda un método de ensayo para la determinación, en el laboratorio, del contenido de agua (humedad) en masas de suelos, rocas, y materiales similares. El método consiste en llevar una determinada masa de suelo a un horno (a temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$) donde la reducción en masa por secado, se debe a la pérdida de agua. “El contenido de agua es calculado usando el peso de agua y el peso del espécimen seco” (American Society For Testing and Materials, 1998)

iv. Densidad Máxima (ASTM D-4253) y Densidad Mínima (ASTM D-4254).

Según la ASTM, “para muchos suelos libres de cohesión y de drenaje libre, la densidad máxima es uno de los componentes clave para evaluar el estado de compacidad de una masa de suelo, que se produce naturalmente o se coloca durante la construcción”. “La densidad relativa,

expresa el grado de compacidad de un suelo sin cohesión con respecto a la condición más suelta y más densa como se define en los procedimientos estándar de laboratorio”.

Solo cuando se compara con el posible rango de variación, en términos de densidad relativa, la densidad puede relacionarse con el esfuerzo de compactación utilizado para colocar el suelo en un relleno compactado o indicar un cambio de volumen y tendencias de tensión y tensión de suelo cuando se somete a carga externa. (American Society For Testing and Materials, 2016).

Entonces podemos expresar el cálculo de la densidad relativa o grado de compacidad, de la siguiente manera.

$$DR (\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100$$

Dónde: e_{min} = razón de vacíos del suelo en su estado más compacto.

e_{max} = razón de vacíos del suelo en su estado más suelto.

e = razón de vacíos del suelo en su estado natural.

Sin embargo, es conveniente expresar la densidad relativa en función de los pesos unitarios o densidades secas del suelo, pues el cálculo de la relación de vacíos, requiere del valor de la gravedad específica del suelo, por lo que la densidad relativa puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$DR (\%) = \frac{\gamma d_{max} * (\gamma d - \gamma d_{min})}{\gamma d * (\gamma d_{max} - \gamma d_{min})} \times 100$$

Dónde: γd_{max} = peso unitario seco del suelo en su estado más compacto.

γd_{min} = peso unitario seco del suelo en su estado más suelto.

γd = peso unitario seco in situ.

Calculada la DR a continuación presentamos una tabla; donde Terzaghi expresó el estado del suelo según su densidad relativa.

Tabla 6: Clasificación del estado del suelo de acuerdo a su

<i>Estado del suelo</i>	<i>Densidad Relativa (%)</i>
Muy suelto	0 – 15
Suelto	15 – 35
Medio	35 – 65
Denso	65 – 85
Muy denso	85 – 100

Fuente: Dujisin D., 1974.

v. Corte Directo.

Este ensayo nos permite conocer los parámetros de resistencia de un suelo (cohesión y ángulo de fricción)

Dependiendo del equipo, la prueba de corte puede ser de esfuerzo controlado o deformación controlada. En las pruebas de esfuerzo controlado, la fuerza de corte es aplicada en incrementos iguales hasta que la muestra falla y ésta ocurre a lo largo del plano de división de la caja de corte. Después de la aplicación de cada carga incremental, el desplazamiento cortante de la mitad superior de la caja se mide con un indicador horizontal. El cambio en la altura de la muestra (y por lo tanto el cambio de volumen) durante la prueba se puede obtener a partir de las lecturas de un indicador que mide el movimiento vertical de la placa superior de carga. (Braja M, 2015)

Por otro lado la deformación controlada para Braja M, Das, se da por medio de un motor que actúa a través de engranajes donde se aplica una velocidad constante de desplazamiento de cizalladura a una mitad de la caja. La constante de velocidad de desplazamiento de corte se mide mediante un indicador de cuadrante horizontal. La fuerza de resistencia cortante del suelo

correspondiente a cualquier desplazamiento de cizalladura se puede medir por un anillo de prueba horizontal o celda de carga. El cambio de volumen de la muestra durante la prueba se obtiene de una manera similar a las pruebas de esfuerzo controlado.

Para (Gonzalez De Vallejo, Ortuño Abad, Ferrer Gijon, & Oteo Mazo, 2002), una prueba completa sobre un determinado suelo consiste en ensayar tres muestras idénticas del mismo material bajo tres cargas verticales distintas (N_1 , N_2 , N_3). Es decir bajo tres tensiones normales diferentes; basta dividir cada carga (N) por la sección (S_0) de la muestra para obtener la tensión normal actuante.

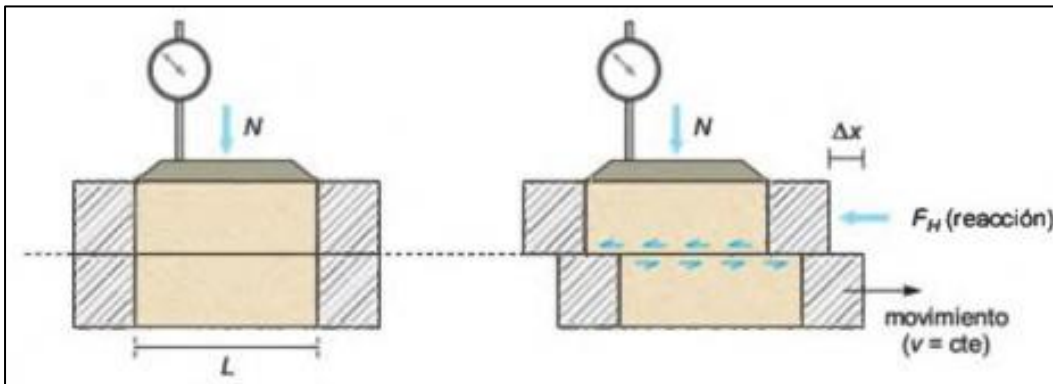


Figura 11: Esquema del aparato de corte directo.

Fuente: (Gonzalez De Vallejo et al., 2002)

En cada uno de los ensayos individuales mientras que se obliga a la parte inferior de la caja a desplazarse horizontalmente a velocidad constante, se va midiendo lo siguiente:

- La fuerza (F_H) necesaria para impedir el movimiento de la parte superior. Dividiendo dicha fuerza por la sección (S_0) de la muestra se obtiene la tensión tangencial (τ) actuante en cada momento sobre el plano de corte.

- El desplazamiento vertical de la muestra. Teniendo en cuenta que las paredes de la caja de corte son rígidas, como en el edómetro, la deformación vertical medida (δ_ε) proporciona directamente el cambio de volumen de la muestra (δ_v), ya que:

$$\delta_\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta H * S_0}{H_0 * S_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = \delta_v$$

- Dónde:
- H_0 = altura inicial de la muestra (4,2 cm en las cajas de corte habituales).
 - S_0 = sección de la muestra (usualmente 36 cm² para cajas de L= 6 cm de lado).
 - V_0 = volumen del suelo.
 - ΔH = desplazamiento vertical (positivo si es un acortamiento)
 - ΔV = variación de volumen de suelo (positivo si es una compresión)

A continuación se muestra un gráfico para la obtención del ángulo de fricción ϕ' .

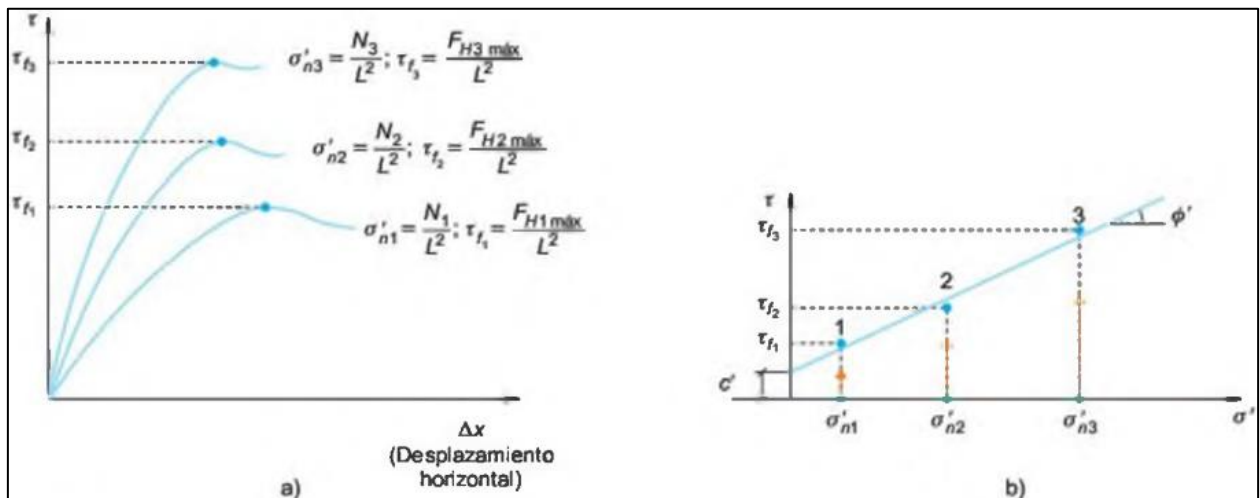


Figura 12: Obtención de la envolvente de rotura y los parámetros de resistencia al corte (c' , ϕ') a partir de un ensayo de corte.

Fuente: (Gonzalez De Vallejo et al., 2002)

vi. Ensayo de Esfuerzo - Deformación en Edómetro.

Según (Lambe & Whitman, 2012), en su libro Mecánica de Suelos, indica que en la prueba edométrica, es aquella donde se aplica presión a la muestra de suelo teniendo como guía el eje

vertical, impidiendo la deformación en sentido horizontal. “Así pues, la deformación axial es exactamente igual a la deformación volumétrica. En esta prueba la relación entre la presión lateral y la vertical, es el coeficiente de presión lateral en reposo (K_0)”.

Lambe define el “esfuerzo en un suelo seco como la fuerza existente en el esqueleto mineral por unidad de área de suelo”.

Por otro lado indica que, “las deformaciones experimentadas por un elemento de suelo son el resultado de las deformaciones internas y los movimientos relativos entre las numerosas partículas que componen dicho elemento (Lambe & Whitman, 2012).

Como describe (Gonzalez De Vallejo et al., 2002) Para estudiar las características de compresibilidad unidimensional del suelo en laboratorio se acude al ensayo edométrico, que se lleva a cabo en el edómetro. También mencionan que el edómetro consiste en un anillo rígido de acero en cuyo interior se coloca la probeta de suelo, habitualmente extraída de una muestra inalterada. En la parte inferior y superior de la probeta se colocan unas piedras porosas que permiten el drenaje del agua contenida en el suelo. El conjunto se introduce en una célula, que se llena de agua para mantener en todo instante las condiciones de saturación completa. A continuación se muestra un esquema del instrumento.

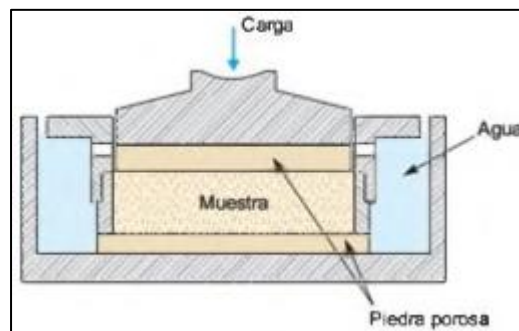


Figura 13: Célula edométrica
Fuente:(Gonzalez De Vallejo et al., 2002)

La siguiente figura muestra la ley de presión intersticial (u_0) antes de la aplicación del escalón de carga, que es hidrostática y viene gobernada por el nivel de agua en la célula (el nivel freático). Suponiendo que el terreno ensayado es de baja permeabilidad, la aplicación de un escalón de carga $\Delta\sigma_v$ dará lugar de forma inmediata a un incremento de presión intersticial de igual magnitud: $\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_v$. (Gonzalez De Vallejo et al., 2002)

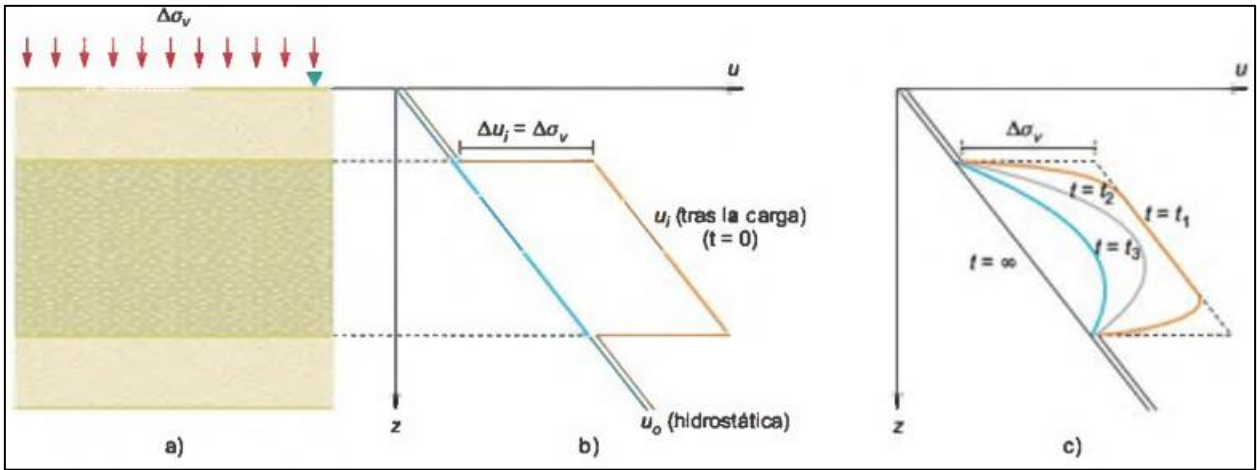


Figura 14: Evolución de la presión intersticial en un edómetro.

Fuente: (Gonzalez De Vallejo et al., 2002)

(Gonzalez De Vallejo et al., 2002), muestra la ley de presión intersticial para un tiempo t_1 , tras el escalón de carga $\Delta\sigma_v$. Observando un punto P cualquiera del suelo situado a una profundidad genérica z , resulta inmediato comprobar que en ese instante su exceso de presión de poros resulta Δu^t , y que la disipación ocurrida ha dado lugar a un incremento de tensión efectiva vertical $\Delta\sigma_v^{f(t)}$. Evidentemente, por el postulado de Terzaghi la suma de ambas ha de ser igual al incremento de tensión total original:

$$\Delta\sigma_v = \Delta\sigma_v^{f(t)} + \Delta u^t$$

Llamando σ_v^f y u_0 a la tensión efectiva y a la presión de poros existentes en ese punto antes del escalón de carga aplicado, en el instante (i) considerado se tendrá:

- En el momento de la carga $\Delta\sigma_v$.

$$\sigma_v^{f(i)} = \sigma_{v0}^i$$

$$u_i = u_0 + \Delta\sigma_v$$

- En un instante cualquiera:

$$\sigma_v^{f(t)} = \sigma_{v0}^t + \Delta\sigma_v^{f(t)}$$

$$u^t = u_0 + \Delta u^t$$

- Cuando finalice la consolidación:

$$\sigma_v^{f(final)} = \sigma_{v0}^t + \Delta\sigma_v$$

$$u^{final} = u_0$$

En cualquier caso, dado que se suele hablar de “excesos de presión intersticial” sobre la de equilibrio, o de incrementos de tensión efectiva, es habitual representar gráficamente tan sólo dichos incrementos.

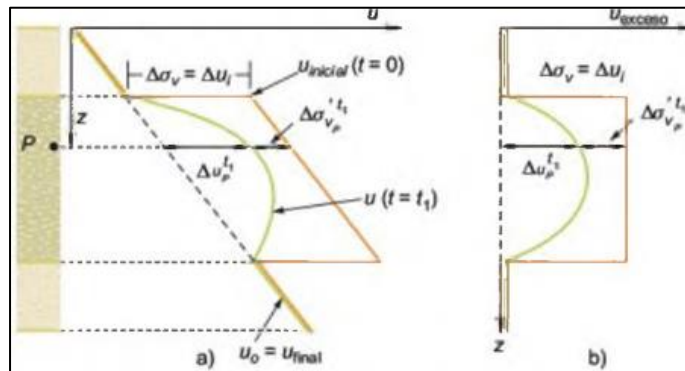


Figura 15: Proceso de disipación de presión intersticial y aumento de las tensiones efectivas.

Fuente: (Gonzalez De Vallejo et al., 2002)

Según (Gonzalez De Vallejo et al., 2002). Cuando se realiza un ensayo edométrico es habitual llevar a cabo una serie de escalones de caiga y de descaiga. Su representación se realiza llevando en ordenadas las deformaciones verticales unitarias (ϵ_v %) o los índices de poros sucesivos, y en abscisas las tensiones efectivas verticales de cada escalón. Dado que lo que realmente se mide es la compresión vertical ΔH de una pastilla de suelo de espesor inicial H_0 , para determinar el índice de poros tras cada escalón de caiga se hace uso de la relación ya justificada anteriormente:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \text{ Entonces tenemos: } e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0} (1 + e_0)$$

Donde e_0 es el índice de poros inicial de la muestra.

A continuación se muestra un ejemplo de curvas de un ensayo edométrico.

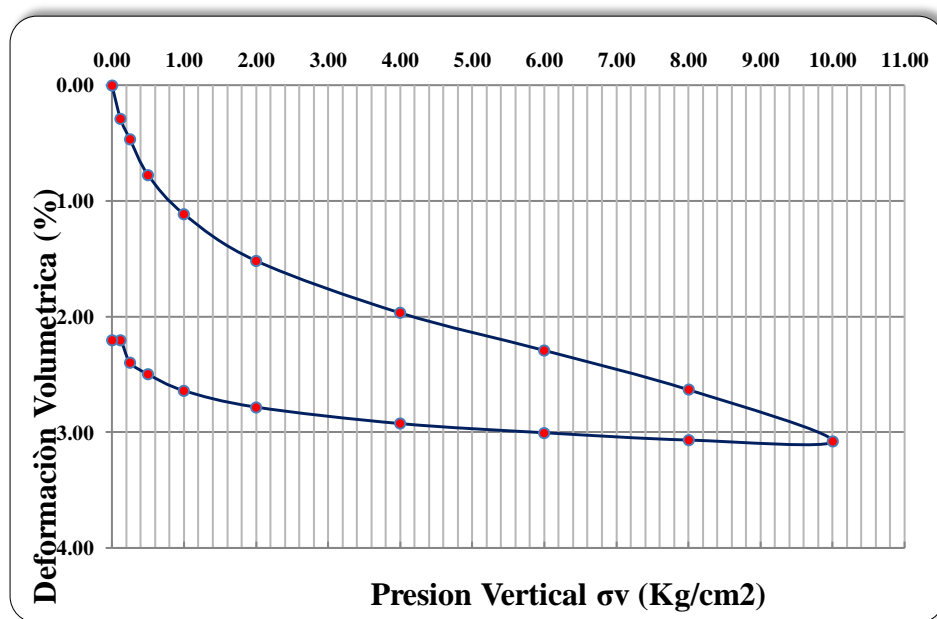


Figura 16: Ejemplo de gráfico edométrico

2.2.6. Cálculo Estructural

El cálculo estructural para el diseño de la estructura de las placas para el tunnel liner, están restringidas por la norma ASSHTO en su sección 12.13 (año 2004) y sección 15 (año 2002)

Según (Guerrero Issotta, 2013). “La resistencia estructural de un tunnel liner está dado por la resistencia del área de acero y el confinamiento del suelo circundante. Dando importancia no solo a la calidad del revestimiento, sino también un adecuado relleno entre la estructura y la excavación”.

Para el diseño estructural, se verifican 3 puntos importantes:

2.2.6.1. Resistencia a la compresión.

Se tiene en cuenta las características mecánicas del material, también los aspectos geométricos, con el objetivo de controlar el pandeo de las planchas. Se debe cumplir que:

$$\frac{T}{A} = \frac{f_{cr}}{FS_p}$$

Donde:

FS_p : Factor de seguridad para el pandeo, se recomienda

A : Área efectiva de sección transversal de la placa de revestimiento.

f_{cr} : Tensión de pandeo [psi], sin exceder la fuerza de fluencia. Se calcula según la siguiente fórmula;

$$f_{cr} = \begin{cases} f_{\mu} - \left[\frac{f_{\mu}^2}{48E} \left(\frac{kD}{r} \right)^2 \right] [psi] & \text{Si } D < \frac{r}{k} \sqrt{\frac{24E}{f_{\mu}}} \\ \frac{12E}{\left(\frac{kD}{r} \right)^2} [psi] & \text{Si } D > \frac{r}{k} \sqrt{\frac{24E}{f_{\mu}}} \end{cases}$$

Donde:

f_u : Fuerza de tracción mínima especificada. [psi]

k: Factor de rigidez del suelo, variarán de 0,22 (para suelos con $f > 15^\circ$) a 0,44 (para suelos $f < 15^\circ$)

D: Diámetro de la tubería. [in]

r: Radio de giro de la sección. [in]

E: Módulo de elasticidad. [psi]

$$T = P \frac{S}{2} (\text{Compresión Axial})$$

Donde:

S: Diámetro o luz de la tubería, en [in].

P: Presión de diseño sobre la clave del tubo. $P = P_D + P_L$ (psi), donde;

P_L : Es la carga vertical en el nivel de la parte superior del revestimiento del túnel debido a las cargas vivas.

P_D : Es la carga vertical en el nivel de la parte superior del revestimiento del túnel debido a la carga muerta.

Los valores de P_D se pueden calcular usando la fórmula de Marston para la carga o cualquier otro método adecuado. Según Martson;

$$P_D = C_a W S$$

Donde,

C_a : Coeficiente para tunnel liner. Depende de la altura de suelo sobre la parte superior del túnel H y el diámetro S

W: Peso unitario húmedo del suelo.

S: Diámetro o luz de la tubería.

Los valores de C_d se pueden obtener a través del siguiente cuadro.

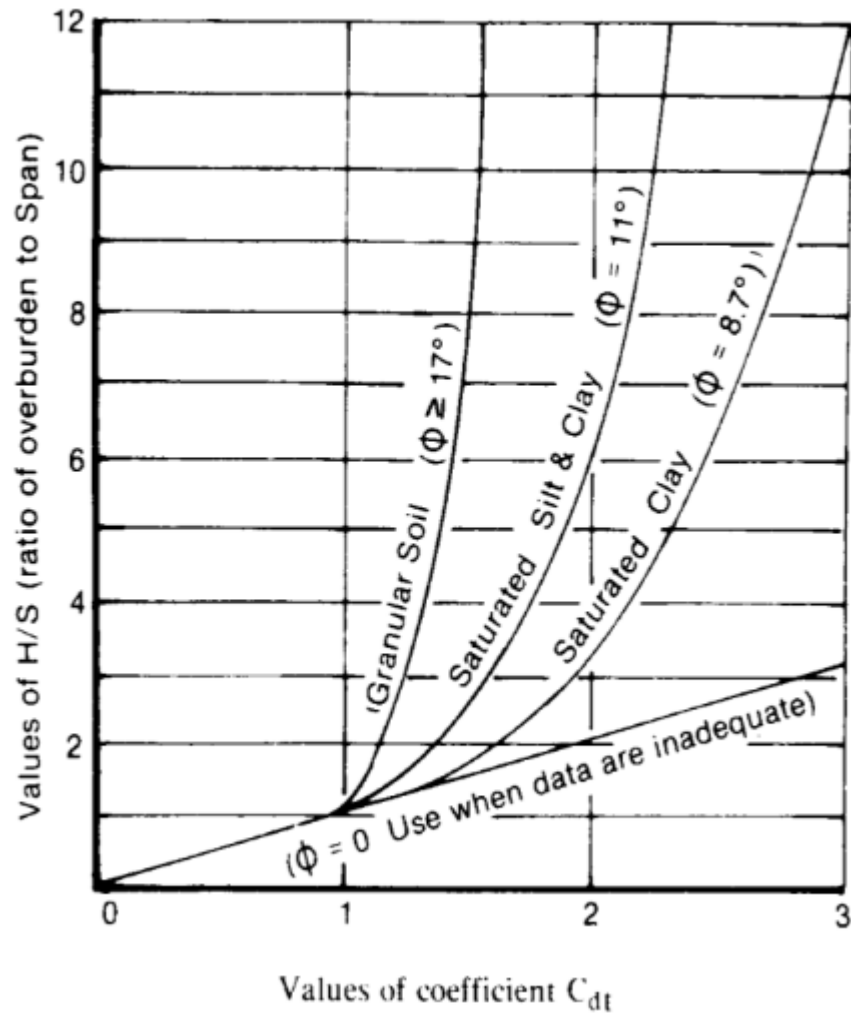


Figura 17: Coeficiente C_d de túneles en el suelo ($\phi =$ ángulo de fricción)
Fuente: (AASHTO, 2012)

2.2.6.2. Resistencia a la conexión emperrada

Ésta depende solamente del espesor de las planchas a utilizar. Por lo que debe cumplir con la siguiente condición:

$$T \leq \frac{R_j}{FS_j}$$

Donde:

$$T = P \frac{D}{2} \text{ (Compresión Axial)}$$

R_j : Resistencia nominal de la costura.

FS_j : Factor de seguridad de la costura, se recomienda $FS_j = 3$

2.2.6.3. *Rigidez a la manipulación*

La rigidez estructural tiene que ser la más óptima posible, debido a que de ello depende el montaje de la estructura. Se dice que una estructura tiene una adecuada rigidez cuando esta es fácil de manipular. Debe cumplir con la siguiente restricción:

$$\text{Rigidez mínima} = \frac{EI}{D^2} \geq 50$$

Donde,

E: Módulo de elasticidad. [psi]

I: Momento de inercia de la placa. [in⁴/in]

D: Diámetro de la tubería. [in]

Este procedimiento analítico, será verificado mediante el análisis numérico de elementos finitos, el cual considera todas las características geotécnicas, tales como resistencia y rigidez, de los diferentes depósitos de suelo registrados y que circundan el tunnel liner, así como las condiciones geométricas y cargas de servicio de las infraestructuras urbanas que circundan el área de desarrollo del proyecto, a partir de estas consideraciones, se determinará la estabilidad a la deformación de las planchas que revisten el tunnel liner, controlando las deformaciones permisibles para las características de material (plancha metálicas) consideradas en el procedimiento analítico.

2.2.7. Métodos de estimación de deformaciones inducida por excavación de túneles

La construcción de túneles en suelos urbanos se ha hecho cada vez más frecuente, sin embargo la presencia de estos túneles trae como consecuencias inevitablemente una alteración en el terreno, asentamientos superficiales o fenómeno de la subsidencia. Este movimiento puede afectar a las estructuras superficiales o subterráneas existentes. Entonces es de gran importancia la posibilidad de evaluar el asentamiento superficial, ya que con la estimación de esos movimientos y con ello la verificación del riesgo que podemos ocasionar a las estructuras adyacentes, podemos diseñar estructuras que garantizan seguridad.

En la actualidad, con el avance y el desarrollo en la capacidad de modelado numérico, el modelado con elementos finitos se ha convertido en una herramienta muy popular (en países europeos) para la predicción de asentamientos en suelos causados por túneles. El empleo de modelos numéricos, siempre requiere tener como base el conocimiento de los métodos simples pero confiables.

En este capítulo, se resume los métodos empíricos, analíticos y numéricos para la estimación de los asentamientos, el comportamiento del terreno en la superficie debido a la construcción de túneles en suelos blandos.

2.2.7.1. *Métodos Empíricos*

Según (Flores López, 2010), los métodos empíricos estiman los asentamientos superficiales basados en simplificaciones asumidas en términos de la geometría del túnel, la estratificación del suelo (por lo general se consideran suelos homogéneos con comportamientos isotrópicos) y las propiedades de resistencia de los materiales.

En la práctica es común la aplicación de estos tipos de métodos para evaluar los asentamientos del terreno. Sin embargo estos métodos no son capaces de modelar la realidad compleja de los efectos que puede provocar un túnel en el suelo, la distribución de los movimientos del suelo alrededor del túnel y los efectos del tiempo, debido a la complejidad de estos análisis.

La primera aproximación del cálculo de los asentamientos fue descrita por Schmidt (1969), quien en su trabajo asemeja la superficie de asentamientos a una campana de Gauss invertida. Peck (1969) mediante muchas observaciones hechas en campo (25 casos de túneles excavadas en suelos cohesivo y granular) relaciono deformaciones y distancias y desarrollo una curva que describe dichos movimientos. (Rodríguez Rodríguez, 2014)

Entonces a continuación se describe el método empírico basada en los estudios y experiencias de estos autores.

2.2.7.1.1. Modelo tradicional de Peck.

Este método se basa en experiencias observadas y la comparación de asentamientos reales medidos a los descritos por la función. El cálculo de los asentamientos, está definido en la siguiente expresión:

$$S_{v(x)} = S_{vmax} * e^{-\frac{x^2}{2*x_i^2}}$$

Donde:

S_{vmax} : asentamiento máximo sobre el eje del túnel.

x : distancia horizontal desde el eje del túnel.

x_i : distancia horizontal desde el eje del túnel al punto de inflexión de canal de asentamiento.

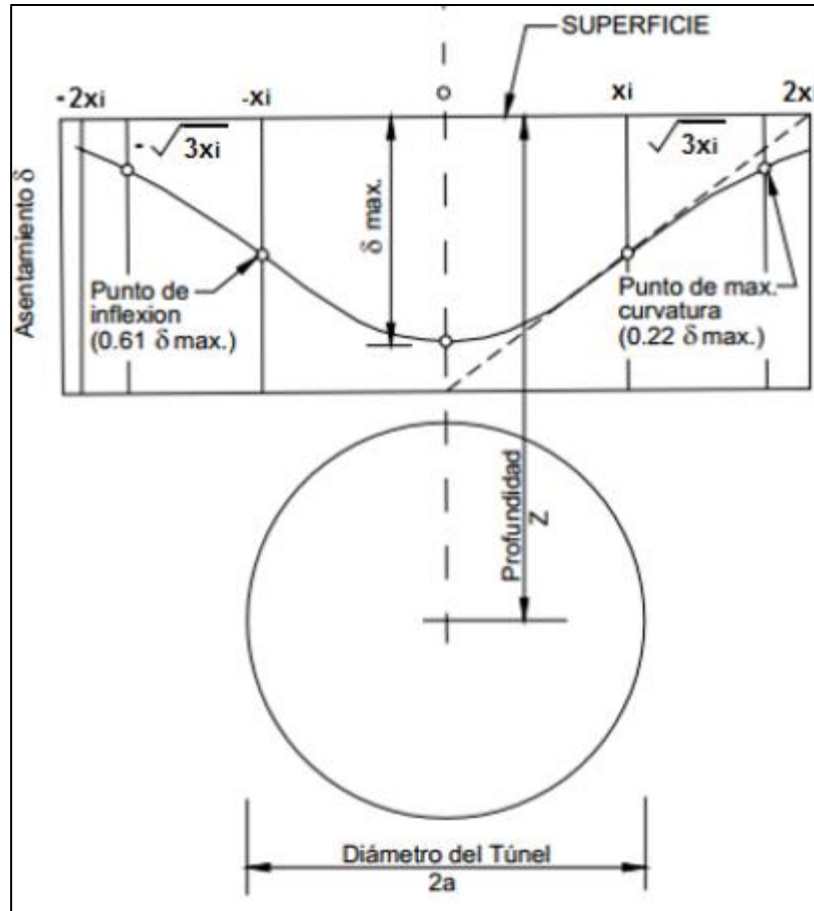


Figura 18 : Relaciones Geométricas de la Curva de Gauss.

Fuente:(Rodríguez Rodríguez, 2014)

El valor del asentamiento máximo (S_{vmax}) y la distancia al punto de inflexión (x_i) se pueden calcular de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Para el valor de S_{vmax} , Peck propone:

$$S_{vmax} = \frac{V_s}{2.5x_i}$$

Donde:

V_s : representa la pérdida de volumen del suelo en la superficie inducida por la excavación del túnel.

x_i : distancia horizontal desde el eje del túnel al punto de inflexión de canal de asentamiento.

Según (Rodríguez Rodríguez, 2014), Oteo y Sagasetta (1981), consideraron un túnel de sección circular, sin revestimiento, para un suelo continuo, homogéneo, isotrópico, lineal y elástico en condición plana de deformaciones y proponen la siguiente ecuación:

$$S_{vmax} = \frac{(0.85 - \mu) * \gamma * D^2}{E}$$

Donde:

μ : Relación de poisson

γ : Peso específico del suelo

D: diámetro del túnel

E: módulo de elasticidad del terreno

Según (Rodríguez Rodríguez, 2014). Para determinar la distancia al punto de inflexión (x_i), O'Reilly (1982) y New (1991), establecieron una expresión para determinar el valor del punto de inflexión dependiendo del tipo de suelo:

- ✓ Para suelos cohesivos y $3m \leq Z_0 \leq 34m$, se plantea la siguiente ecuación:

$$x_i = 0.43 * Z_0 + 1.1m$$

- ✓ Para suelos granulares y $6m \leq Z_0 \leq 10m$, se plantea la siguiente ecuación:

$$x_i = 0.28 * Z_0 + 0.12m$$

- ✓ Leach (1985) propuso para sitios donde los efectos de la consolidación son insignificantes:

$$x_i = (0.57 + 0.45 * Z_0) + 1.01m$$

Donde:

Z_0 : Profundidad desde la superficie hasta el eje central del túnel.

Peck propuso la ubicación del punto de inflexión (x_i) a partir de la profundidad relativa del túnel ($Z/2a$) y del tipo de suelo. El cálculo se basa en el cruce de datos entre las ordenadas y abscisas en la gráfica que se muestra a continuación:

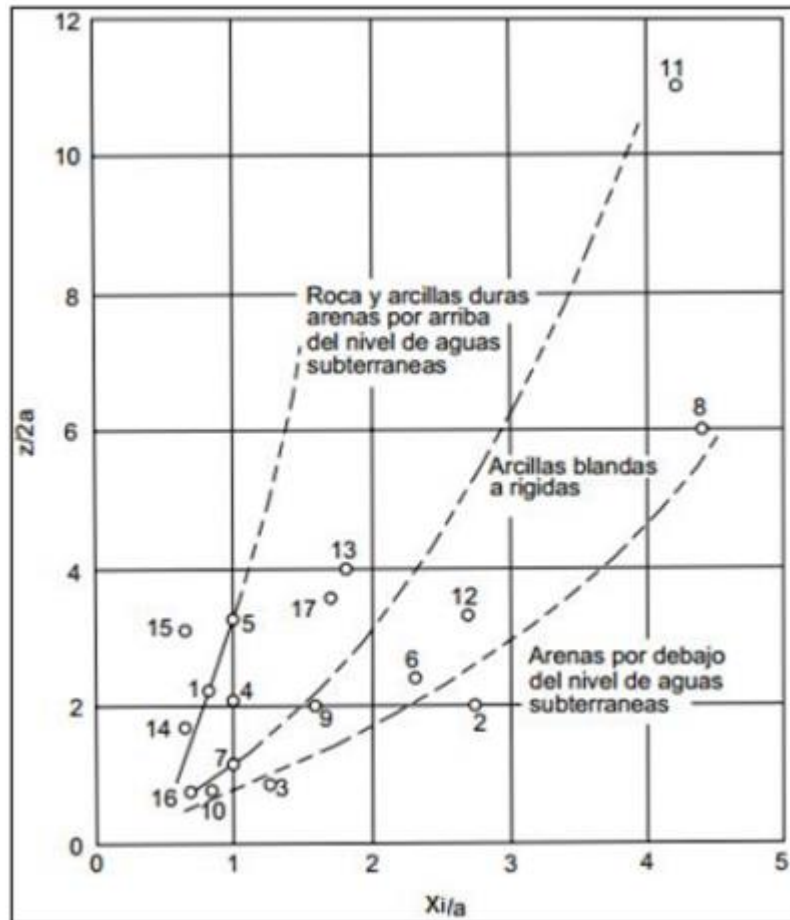


Figura 19: Localización del Punto de Inflexión, según Peck 1969.

Fuente: (Rodríguez Rodríguez, 2014)

2.2.7.2. Métodos Analíticos.

Según (Senthilnath & Velu, 2016) describe que Sagasetta (1987) propuso una solución de forma cerrada combinando el flujo del fluido con la solución elástica para la mitad del espacio. Este método permite la evaluación del campo de deformación en un suelo inicialmente isotrópico

y homogéneo incompresible. Más adelante, Booker y Verruijt (1998) presentaron una solución analítica utilizando la generalización de la solución de Sagaseta. Este método permite el cálculo de los desplazamientos verticales de superficie, así como los desplazamientos verticales a diferentes profundidades por debajo del nivel del suelo y los desplazamientos horizontales a lo largo de una sección transversal.

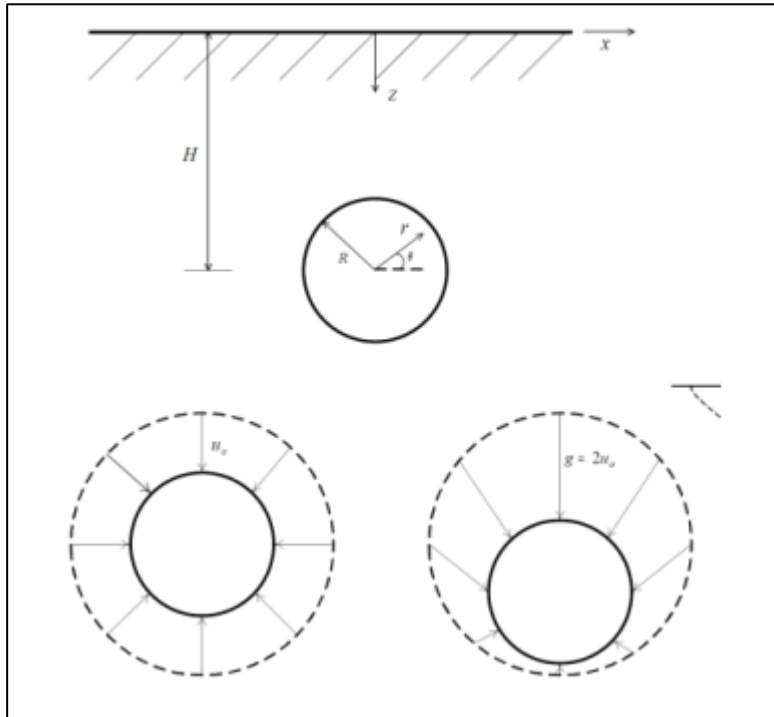


Figura 20: Deformación del suelo (a) Desplazamiento radial uniforme (b) Desplazamiento radial de forma ovalada.

Fuente: (Senthilnath & Velu, 2016)

(Senthilnath & Velu, 2016) también describe que, Loganathan y Poulos (1998) presentaron una forma modificada de Booker y Verruijt (1998) sugiriendo el uso de un parámetro de pérdida de terreno equivalente modificado. El asentamiento de la superficie y el desplazamiento lateral se pueden obtener como:

$$\text{Desplazamiento lateral } (u_{x,z=0}) = -\frac{4gR + g^2}{2} e^{-\frac{1.38x^2}{(H+R)^2}} \frac{x}{x^2 + H^2}$$

$$\text{Asentamiento superficial } (u_{x,z=0}) = \frac{4gR + g^2}{2} e^{-\frac{1.38x^2}{(H+R)^2}} \frac{x}{x^2 + H^2}$$

Donde:

g: parámetro de pérdida de terreno.

H: es la profundidad del eje del túnel, desde la superficie del suelo.

R: es el radio del túnel.

z: es la medida de la profundidad desde la superficie del suelo.

x: es la distancia lateral desde el centro del túnel.

Los métodos recientes, como Pinto y Whittle (2014), han propuesto una solución simplificada de forma cerrada analítica para tener en cuenta la plasticidad del suelo en el análisis (Senthilnath & Velu, 2016).

2.2.7.3. *Métodos Numéricos.*

La aplicación de los métodos numéricos para la simulación de túneles, comenzó a emplearse a partir del año 1960. En su principio, la dificultad radica en la capacidad de cálculo de los ordenadores. Sin embargo, ahora el aumento de la capacidad de los ordenadores ha impulsado la revolución en el área de la simulación de los túneles.

El cálculo de asentamientos y movimientos a suelo adyacente y estructuras existentes, causadas por túneles es un desafío significativo que enfrentan los ingenieros civiles y geotécnicos. Pero con los métodos numéricos, se van dando soluciones a estas dificultades, ya que es posible *evaluar los estados de esfuerzos y deformaciones de la masa de suelo, en cualquier punto alrededor del túnel y en la superficie del terreno.*

Los métodos numéricos a diferencia de los empíricos y analíticos, nos brindan la facilidad de modelar detalladamente estructuras complejas, incluyendo suelos con distintos estratos

geológicos, cargas transitorias y dinámicas, propiedades geotécnicas del suelo y las secuencias de la construcción del túnel. Los modelos numéricos nos permiten evaluar los movimientos del suelo producidos durante y después de las diferentes etapas de la construcción del túnel. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014)

El uso de los métodos numéricos en dos y tres dimensiones cada vez es más frecuente para investigar los desplazamientos del suelo, la estabilidad del túnel y la interacción del túnel con otras estructuras (Flores López, 2010).

Segun Gnilsen (1989), Son tres modelos los cuales son la base para los métodos numéricos, estos modelos son: Modelo continuo, modelo discontinuo y modelo de reacción de subrasante.

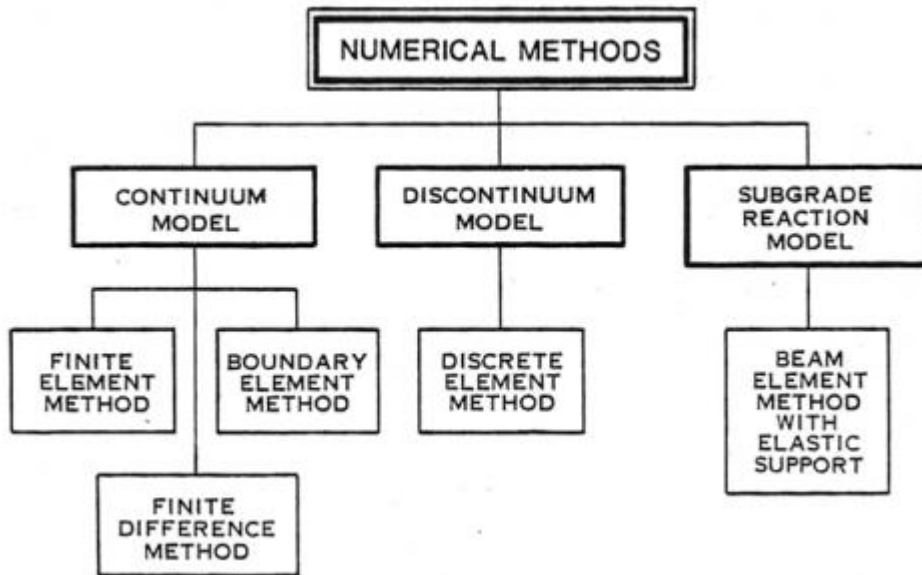


Figura 21: Métodos numéricos y modelos para la ingeniería de túneles. Gnilsen, 1989)

Fuente:(Serkan, 2006)

Como se aprecia en el cuadro anterior, los métodos numéricos asociados con estos modelos son: método de elemento de haz con soporte elástico, método de elemento finito (FEM), método

de diferencia finita (FDM), método de elemento de límite (BEM) y método de elemento discreto (DEM).

2.2.7.3.1. Método de elemento de viga con soporte elástico.

También conocido como el método de Reacción del Coeficiente de Subrasante.

Según (Serkan, 2006), el revestimiento del túnel está simulado por elementos de viga. El suelo circundante, que proporciona la incrustación del revestimiento, está simulado por elementos de resorte. Los elementos de resorte se orientan típicamente perpendiculares al revestimiento, simulando las tensiones normales inducidas al suelo desde la desviación hacia afuera del revestimiento. Además, los elementos de resorte tangenciales pueden simular tensiones de cizalladura inducidas entre el revestimiento y el suelo. La rigidez de los elementos de resorte se determina a partir de la rigidez, es decir, el módulo, del suelo y la curvatura del revestimiento. Para simular las condiciones reales, los elementos de resorte bajo tensión deben eliminarse del cálculo. Esto se hace a través de un proceso iterativo.

Las fortalezas y debilidades del método son:

Fortalezas:

Para realizar el análisis del el revestimiento de un túnel con este método, se puede usar una gran cantidad de programas informáticos.

Debilidades:

Con este método solo se puede simular condiciones de suelo y túnel muy simples.

Cada elemento de resorte simula la incrustación que proporciona el área de suelo que representa. A diferencia de las condiciones reales, los elementos de resorte, es decir, áreas de tierra de soporte, no están conectados entre sí. (Serkan, 2006)

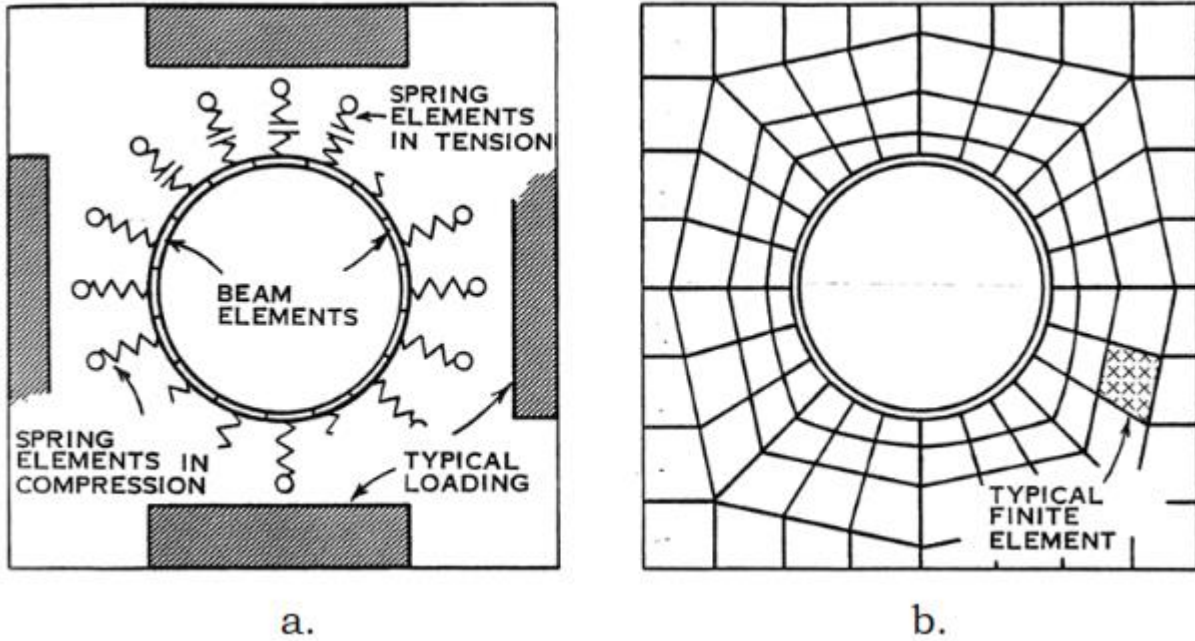


Figura 22: a) Modelo de elemento viga con soporte elástico. b) Modelo de elementos finitos (Gnilsen, 1989)

Fuente: (Serkan, 2006)

2.2.7.3.2. Método de elemento finito (FEM)

El método de elementos finitos se considera la técnica analítica más adecuada para resolver problemas geotécnicos. Este método es el más empleado para predecir la subsidencia inducida por un túnel.

En este método, el subsuelo se modela como un continuo, las discontinuidades se pueden modelar individualmente. El dominio del problema se discretiza en un número limitado de elementos que están conectados en puntos nodales. Cada elemento es finito, definido geoméricamente y tiene un tamaño limitado, de ahí deriva el nombre del método. (Serkan, 2006)

Realizar el análisis adecuado de los efectos inducidos por la instalación del túnel, demanda identificar una metodología eficiente de modelado del proceso de instalación del túnel, de acuerdo a la amplitud de la dificultad del caso. Otro aspecto muy importante es hacer uso de los modelos constitutivos adecuados para realizar una eficiente simulación de la tunelización.

a) Modelados en 2D del procedimiento de instalación de un túnel aplicando el FEM

El campo de los desplazamientos debido a la excavación del túnel es un problema tridimensional, entonces es necesario hacer un análisis tridimensional para examinar correctamente la respuesta esfuerzo-deformación del túnel. Sin embargo, realizar el análisis tridimensional es relativamente complejo, requiere un recurso computacional grande en cuanto a almacenamiento y tiempo, por lo que hay casos en la que se recurre a análisis simplificados en dos dimensiones.

Entonces un tema muy discutido es la cuestión de si las fuerzas estructurales en los revestimientos de túneles, así como los asentamientos deben ser calculados por un análisis totalmente tridimensional, o si los modelos bidimensionales más simples son suficientes. (Möller, 2006)

Según Gioda y Locatelli (1999), el análisis en dos dimensiones pueden ser empleados con éxito para hacer el análisis en sentido inverso para calcular los asentamientos inducidos por el tuneleo.

Según Swoboda (1979), los análisis en dos dimensiones pueden ser utilizados para simular el efecto de los procesos constructivos, así como la dependencia del endurecimiento del concreto lanzado con el tiempo, los métodos de presión de tierras balanceada y escudos

presurizados, el uso de inyecciones para mejorar las propiedades del suelo y el efecto de la secuencia de instalación del revestimiento en las cargas del mismo.

Según Coulter y Martin (2006), los análisis en dos dimensiones deberán emplear técnicas que aproximen los efectos tridimensionales del frente del túnel.

Según Potts and Zdravkovic (2001), si se van a analizar múltiples túneles poco profundos, o si la respuesta de la superficie del suelo es clave para el análisis, se requiere una representación de deformación plana de la sección transversal (por ejemplo, estudiar los efectos sobre las estructuras).

Para simular el proceso de instalación (excavación y soporte) de un túnel convencional existen diferentes aproximaciones en 2D que son comúnmente empleados en la práctica de la ingeniería. A continuación se describen tres métodos que son los más eficientes:

i) Método de soporte central (Método α)

Según (Möller, 2006). Este método reduce la rigidez del material del núcleo del túnel por un factor α por lo tanto, también se denomina método α . El método se basa en dos fases de cálculo. En una primera fase, las tensiones iniciales se calculan con una carga de gravedad, pero con una rigidez reducida del núcleo ($\alpha \cdot E$). De esta forma, se deja una presión de soporte reducida ($p\alpha$) dentro del túnel y el método puede considerarse el estrés tipo de reducción de enfoque. En la segunda fase, se elimina el suelo dentro del túnel y se activa el revestimiento.

SCHIKORA y FINK (1982) recomiendan valores realistas de $\alpha < 0.2$ para túneles con $2 < H / D < 4$. Para excavaciones parciales sin cierre inmediato del anillo de revestimiento, recomiendan valores de α que oscilan entre 0.3 y 0.5. (Möller, 2006)

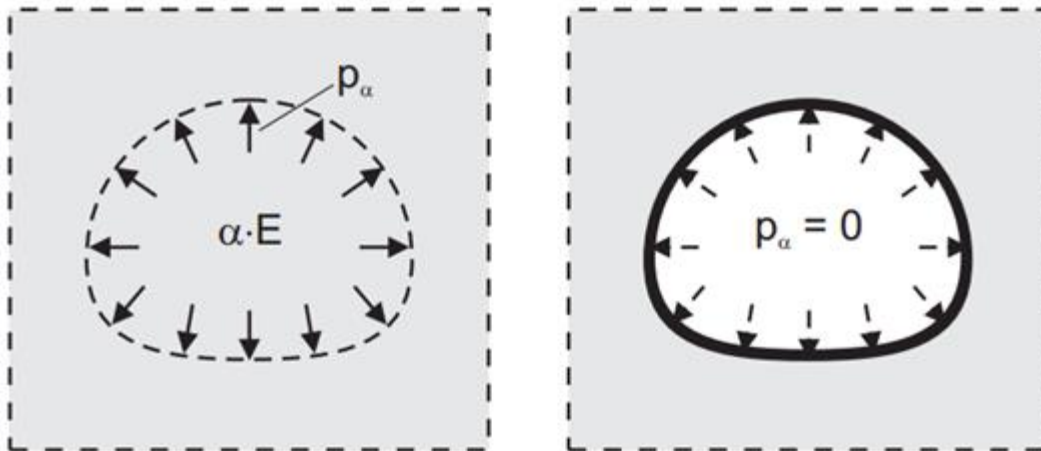


Figura 23: fases cálculo del método de reducción de revestimiento.

Fuente:(Möller, 2006)

ii) Método de reducción de revestimiento (Método δ)

Este método para su desarrollo, al igual que el método anterior, muestra dos fases de cálculo. A partir de las tensiones iniciales (p_0), el revestimiento se activa directamente, pero con una rigidez reducida ($\delta \cdot E$). SCHIKORA y FINK (1982), informan que $\delta < 0.1$ conduce a fuerzas normales realistas. Esto implica un aumento de las relaciones de rigidez α y β y por lo tanto una reducción de las fuerzas de revestimiento estructural. Sin embargo, los momentos de flexión disminuyen más rápido que las fuerzas normales, lo que hace que el método no sea adecuado para analizar fuerzas normales en combinación con momentos de flexión apropiados. Se puede argumentar que los momentos de flexión son menos importantes que las fuerzas normales, pero el método parece no ser utilizado con frecuencia en la práctica de la ingeniería. (Möller, 2006)

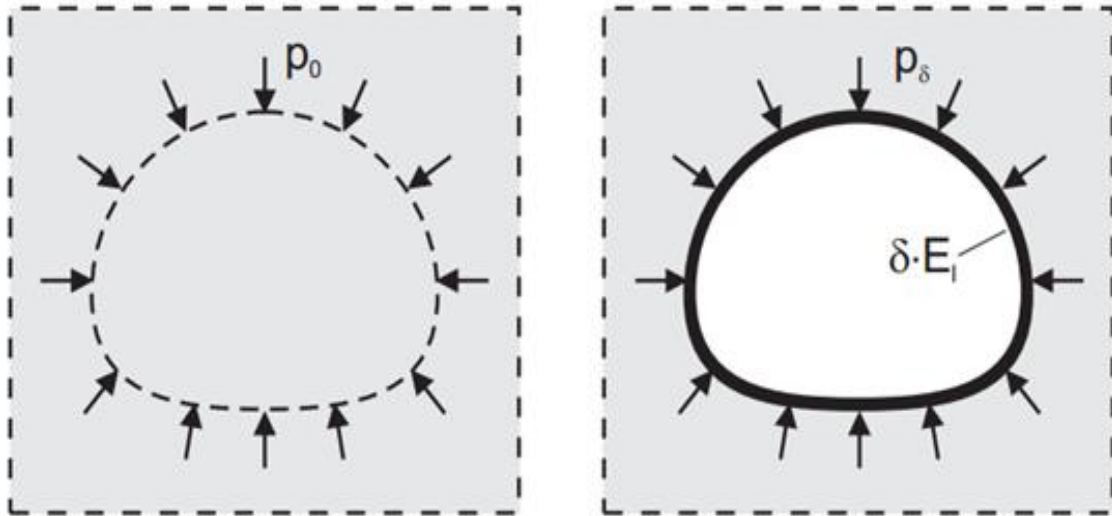


Figura 24: Fases para el cálculo del método de reducción de revestimiento.

Fuente: (Möller, 2006)

iii) Método de reducción del esfuerzo (Método β).

Según (Möller, 2006). Es el método más popular para simular los procedimientos de instalación de túneles. La relajación de la tensión del suelo debido a la instalación retardada del revestimiento de hormigón proyectado y el reparto de la carga entre el suelo y el revestimiento se abordan muy bien con este método. Este método de simulación comprende dos fases de cálculo al igual que los otros dos métodos. Estas dos fases de cálculo están relacionadas con la llamada curva de respuesta en tierra.

Según (Möller, 2006), estas fases se dan de la siguiente manera: En la primera fase, a partir de las tensiones geostáticas iniciales, la instalación del túnel se simula desconectando los elementos de tierra dentro del túnel y la presión inicial (p_0), que actúa en el interior del túnel, se reduce a ($\beta \cdot p_0$), con $0 < \beta < 1$, donde β es el factor de reducción de carga o factor de descarga, a menudo tomando un valor aproximado de 0.5. Hasta ese entonces, solo se carga el suelo y se producen asentamientos S_β . En la segunda fase, el revestimiento se

instala y la carga restante ($\beta \cdot p_0$) se divide sobre el revestimiento y el suelo. Los asentamientos finales (S_{tot}) ocurren en esta fase debido a la carga combinada de suelo y revestimiento. Las fuerzas estructurales en el revestimiento ocurren solo durante esta segunda fase.

Para revestimientos rígidos, la carga restante irá en gran parte al revestimiento. Los factores β pequeños corresponden a grandes longitudes redondas y/o a la instalación tardía del revestimiento del túnel. En este caso, las deformaciones del terreno serán relativamente grandes, mientras que las fuerzas estructurales en el revestimiento serán relativamente bajas. A la inversa, un factor β mayor conduce a deformaciones más pequeñas del terreno y fuerzas estructurales más grandes en el revestimiento. Se mostrará que el método de reducción de esfuerzos (método β) proporciona fuerzas estructurales y asentamientos razonables cuando se usan en combinación con factores de descarga apropiados. (Möller, 2006)

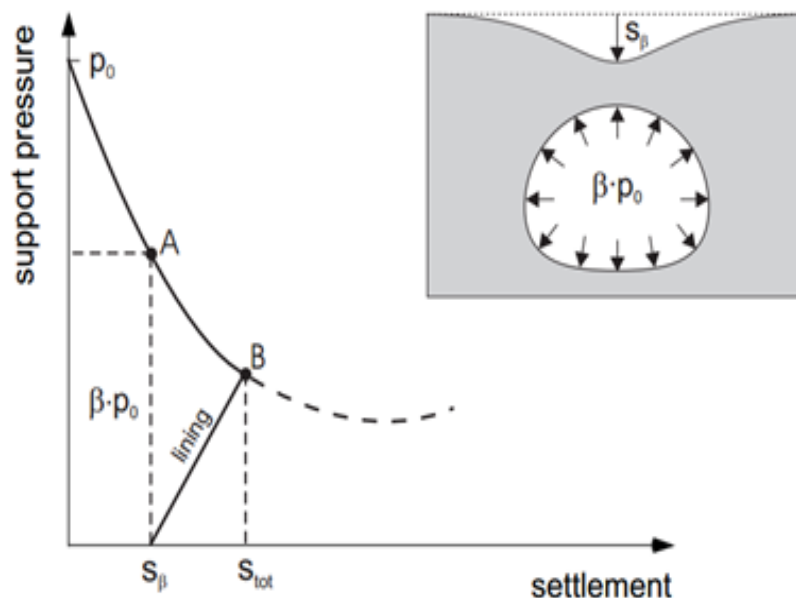


Figura 25: Visualización del método de reducción de esfuerzos adoptando una curva de respuesta al suelo.

Fuente: (Möller, 2006)

b) Modelos constitutivos de los materiales empleados en el modelamiento del túnel.

Según (Galvan Adames, 2014), un modelo constitutivo del material es una formulación o ley matemática que describe el funcionamiento físico macroscópico de un “material idealizado”, que resulta después de aplicar una hipótesis de un “material real”; es decir, es la relación entre la tensión y la deformación, y más concretamente es la relación entre incrementos de tensión e incrementos de deformación de un material.

Los modelos constitutivos que se aplicarán a los materiales son el Lineal-Elastico y el Mohr-Coulomb.

El suelo se puede modelar con diferentes modelos, estos modelos tienen que ser considerados en el proceso de simulación del túnel. La razón por la que se plantea diferentes modelos, es que no todos los tipos de suelos tienen las mismas características y por lo tanto no pueden ser representados por un solo modelo.

i) Modelo lineal elástico.

El modelo elástico lineal se basa en la ley de elasticidad isotrópica de Hooke. Para su utilización involucra dos parámetros elásticos básicos, es decir, el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν). Aunque los modelos elásticos lineales no son adecuados para modelar la tierra, se pueden usar para modelar volúmenes rígidos en el suelo, como paredes de concreto o formaciones rocosas intactas. (Plaxis Models Manual, 2018)

ii) Modelo Mohr-Coulomb.

El modelo lineal elástico de Mohr-Coulomb, perfectamente plástico, incluye cinco parámetros de entrada, es decir, módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν) para la

elasticidad del suelo; ángulo de fricción (ϕ) y cohesión (C) para la plasticidad del suelo y ψ como ángulo de dilatación. Este modelo de Mohr-Coulomb representa una aproximación "de primer orden" del comportamiento del suelo o de la roca. Se recomienda utilizar este modelo para un primer análisis del problema considerado. Para cada capa se estima una rigidez promedio constante, los cálculos tienden a ser relativamente rápidos y se obtiene una primera estimación de deformaciones. (Plaxis Models Manual, 2018)

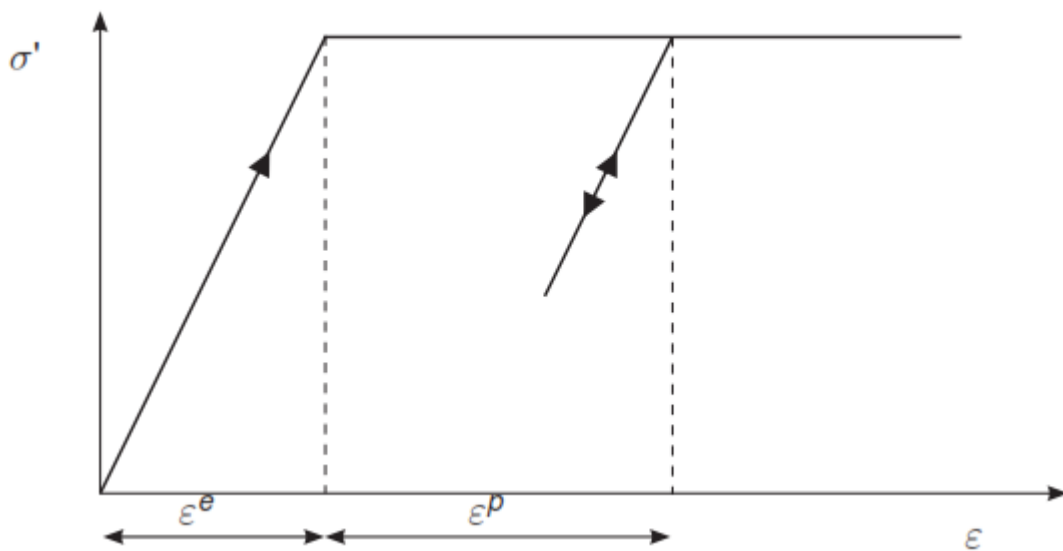


Figura 26: Idea básica de un modelo elástico perfectamente plástico, gráfica tensión vs deformación.

Fuente: (Plaxis Models Manual, 2018)

2.2.7.3.3. Método de diferencia finita (FDM)

El método es similar al Método de elementos finitos en que el subsuelo se modela como un continuo que se divide en una serie de elementos que están interconectados en sus nodos. La principal diferencia radica en el enfoque utilizado para resolver los parámetros desconocidos. En contraste con el enfoque implícito del método del elemento finito, el método de la diferencia finita es el enfoque explícito. (Serkan, 2006)

Según (Serkan, 2006), el método explícito se basa en la idea de que durante un paso de tiempo lo suficientemente pequeño, una perturbación en un punto de malla determinado es experimentada solo por sus vecinos inmediatos. Esto implica que el intervalo de tiempo es más pequeño que el tiempo que tarda la perturbación en propagarse entre dos puntos adyacentes. Para la mayoría de los programas de diferencias finitas, este paso de tiempo se determina automáticamente, de modo que se garantiza la estabilidad numérica

2.2.7.3.4. Método del elemento de límite (BEM)

Según (Serkan, 2006), el método del elemento de límite se usa cada vez más para el análisis lineal y no lineal estático, dinámico y térmico de sólidos. Del mismo modo, la transferencia de calor transitoria y la viscosidad plástica transitoria se simulan con el método. El uso del método de elementos de frontera para la ingeniería de túneles también está creciendo (Banerjee y Dargush 1988).

Al igual que el Método de elementos finitos y el Método de diferencias finitas, el Método de elementos de límites modela el terreno como un continuo.

(Serkan, 2006) cita a Crouch y Starfield (1983) donde se menciona que a diferencia con los dos métodos anteriormente descritos, este método hace necesario una discretización del dominio del problema sólo para el límite de la excavación. El problema se resuelve mediante la integración de las ecuaciones diferenciales parciales.

El método del elemento de límite, es muy eficiente y económico para problemas de dos o tres dimensiones cuando los límites definidos son de gran preocupación.

Sin embargo, según (Serkan, 2006) la capacidad de la mayoría de los programas de elementos de límite, están, con pocas excepciones, limitada al comportamiento fundamental en el terreno

constitutivo. Los complejos procedimientos de características de los materiales de construcción y la dependencia del tiempo no se pueden modelar fácilmente.

2.2.7.3.5. Método de elemento discreto (DEM)

En este método la diferencia principal es que la masa del suelo no se modela como un continuo por el contrario está modelada por bloques individuales que son rígidos en sí mismos.

(Serkan, 2006), referenciando a Cundall (1976), el cual explica que el método es aplicable si los desplazamientos de la junta eclipsan la deformación interna del bloque, de manera que esta última puede descuidarse. En este caso, la deformación de la masa del suelo se rige por el movimiento a lo largo de las uniones entre bloques rígidos. El análisis de elementos discretos comienza con el cálculo de fuerzas incrementales que actúan en las articulaciones. Las aceleraciones resultantes de los bloques rígidos se integran para dar nuevas posiciones y orientaciones de los centroides de bloque. Esto a su vez produce nuevos incrementos de fuerzas conjuntas, que continúan el ciclo de cálculo. El método es especialmente útil para estudios cinemáticos de sistemas de bloques grandes, por ejemplo, donde se modelan masas de roca altamente articuladas alrededor del túnel.

2.2.8. Análisis de Esfuerzos en la Interacción Suelo-Estructura Mediante la Metodología AASHTO

2.2.8.1. Definición de Interacción Suelo-Estructura

Cuando una masa de suelo recibe cargas, es decir esfuerzos, ya sean transmitidas por una cimentación o algún otro tipo de estructura; dicha masa inicia una fase de deformación ya sea en uno o en varios estratos que la compongan. Esta deformación depende de la compresión y las propiedades que presente el suelo, las cuales pueden variar con el tiempo o con algunos factores como lo puede ser una variación de volumen de vacíos, el cual es el resultado de la consolidación

del suelo, el desplazamiento y la disminución de la distancia relativa entre las partículas; produciendo así, de forma acumulada con los demás estratos, un asentamiento en la superficie de contacto entre la cimentación y la masa del suelo (Cuevas Pérez, 2012).

Entonces según (Cuevas Pérez, 2012), de manera simplificada podemos indicar que la interacción suelo – estructura, es el estudio de las deformaciones de un suelo cuando este se ve afectado por la presencia y rigidez de algún tipo de estructura. La influencia de esta estructura puede ser de manera estática o dinámica.

Cabe recalcar que en la presente investigación analizaremos una interacción estática suelo – estructura.

Una vez entendida la definición de interacción suelo – estructura, veremos la forma de proceder para el cálculo del revestimiento del tunnel liner, según la metodología ASSHTO. Para esto se afianza en la teoría de Marston, que generalmente es aplicado para realizar diseño de tuberías enterradas en zanjas abiertas.

Esta metodología se centra específicamente en los esfuerzos provocados por la carga muerta y carga viva. Veamos cómo define la norma (AASHTO, 2012) estas cargas.

2.2.8.2. Carga Muerta:

Al revisar la norma (AASHTO, 2012), en su sección 12.13.2, podemos leer que no aplica el uso de la presión de cargas laterales para túneles. Es decir no se considera la presión en reposo, presentada por k_0 , de manera más sencilla podemos definir que no existirán fuerzas que influyan en el plano horizontal del túnel.

Por lo tanto solo se consideraran cargas de tierra (earth loads, según AASHTO). Como indica (AASHTO, 2012), para determinar las cargas muerta según esta metodología, al no tener métodos

refinados, recomienda lo ya explicado en el ítem 2.2.5.1. El cual se basa en la teoría de Marston, donde considera parámetros como el ángulo de fricción interna, la densidad y la altura del suelo que está sobre la clave del túnel y el diámetro del túnel. Todos estos parámetros se consideran constantes teniendo en cuenta que el tipo de suelo que está sobre la clave del túnel no cambia, suelo homogéneo e isotrópico. Pero al considerar factores constantes (suelo homogéneo), la teoría se limita a casos muy simples ya que, generalmente los suelos presentan diferentes estratos y por ende los parámetros geotécnicos no serán constantes.

A continuación se presenta la fórmula matemática empleada para determinar la carga muerta sobre la estructura del túnel:

$$CM = Cd * \delta * D$$

Donde:

CM: Carga muerta

δ : Peso específico del suelo

D: Diámetro de la estructura.

Cd: Coeficiente de carga o coeficiente de reducción de Marston

2.2.8.3. Carga Viva

La norma (AASHTO, 2012), menciona que las estructuras enterradas deben estar diseñadas para los efectos de la fuerza resultantes de la presión de tierra horizontal y vertical, la carga del pavimento, la carga viva y la tolerancia de carga dinámica vehicular.

Por tratarse de túneles urbanos, es común tener cargas vehiculares, por lo que se calculara la presión que ejerce un camión H20 en función de la altura de relleno o de suelo hasta la clave del túnel, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7: Valores de PL, para una carga de tráfico H20, en función de la altura del suelo

H(m)	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3
P _L (in ² /in)	18.3	12.69	9.27	6.83	5.37	4.39	3.66

Fuente:(AASHTO, 2012)

2.3.Análisis de Esfuerzos en la Interacción Suelo-Estructura Mediante el Software Plaxis 2D

Plaxis es un programa de elementos finitos para aplicaciones geotécnicas en el que se utilizan modelos de suelo para simular el comportamiento del suelo. El código plaxis y los modelos de suelo se desarrollan con mayor cuidado. (Shabna & Sankar, 2016)

(Shabna & Sankar, 2016), también indica que el software se basa en el método de elementos finitos y está diseñado para el análisis geotécnico bidimensional y tridimensional de la deformación y estabilidad de las estructuras del suelo, así como el flujo de agua subterránea y calor, en aplicaciones de geoingeniería como excavaciones, cimientos, terraplenes y túneles. Plaxis 2D Tunnel es un paquete de elementos finitos que se ha desarrollado específicamente para el análisis de deformación y estabilidad en proyectos de túneles.

Según (Shabna & Sankar, 2016). En Plaxis están disponibles los siguientes modelos de suelo: elástico lineal, Mohr-Coulomb, modelo de endurecimiento del suelo y arrastramiento del suelo blando. Con respecto al revestimiento, Plaxis no tiene modelos concretos específicos, pero sí modelos lineales que pueden aplicarse con propiedades concretas. En la versión 2D del programa, las uniones segmentarias se pueden modelar como bisagras.

(Kunst, 2017) indica que el contacto entre el revestimiento y el suelo se puede modelar con una interfaz que consiste en elementos de unión con su propio ángulo de fricción y adherencia. Con respecto a los elementos utilizados en el modelo, para el suelo están disponibles muchos

elementos de volumen de alto orden y para los elementos de revestimiento, placa y viga. Con estos elementos estructurales, las fuerzas estructurales se pueden medir y visualizar.

Hay diferentes tipos de gráficos disponibles para mostrar los resultados, por ejemplo, gráficos de vector y de contorno. Se pueden implementar fases en las que los elementos se pueden activar y desactivar. De esta manera, se puede modelar una construcción escalonada. (Kunst, 2017)

Según (Kunst, 2017). Plaxis es capaz de definir un conjunto coherente de parámetros y un factor parcial de acuerdo con los métodos de diseño del estado límite final, además de los cálculos del estado límite de servicio.

Capítulo III. Materiales y Métodos

3.1. Tipo de investigación

3.1.1. El fin que se persigue

Es una investigación aplicada, ya que se busca mejorar la problemática de los métodos de diseño del tunnel liner.

3.1.2. Tipos de datos analizados

Es una investigación cuantitativa ya que a través de la recolección y análisis de datos se busca conocer la realidad de una manera confiable.

3.1.3. La metodología para demostrar la hipótesis

Es una investigación experimental, ya que luego de identificar las características físicas, geotécnicas y mecánicas del suelo, se controlará los parámetros que más influyen al momento de analizar las deformaciones del suelo generadas por el túnel. Conociendo estos parámetros, se hará el análisis estructural para definir el espesor del revestimiento que controle las deformaciones máximas inducidas por el túnel.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es explicativo o causal, ya que en este estudio se busca conocer en cuánto influye el análisis de los esfuerzos y deformaciones del suelo para el diseño del revestimiento del túnel.

3.3.Limitaciones de la investigación

3.3.1. Delimitación espacial

El trabajo de investigación se realizó al tunnel liner propuesto para el cruce de tuberías, de rebose, en el cruce de la Av. Faucett y la Av. Oscar R. Benavides, de la ciudad de Lima como parte de la obra de la Línea 2 del Metro de Lima.

3.4.Ubicación

Tunnel liner propuesto para el cruce de tuberías de rebose en la Av. Faucett. y la Av. Oscar R. Benavides.



Figura 27: Zona de estudio.

Fuente: Google Earth.

3.5.Variables

3.5.1. Variables Dependientes

- Esfuerzos (σ)
- Deformaciones (ϵ)
- Espesor de revestimiento (e)

3.5.2. Variables Independientes

- Diámetro del túnel (D)
- Factor camión
- Coeficiente de reducción de Marston (Cd)
- Angulo de cohesión (C)
- Módulo de Poisson (ν)
- Peso específico (δ)
- Módulo de elasticidad (E)
- Angulo de fricción (ϕ)
- Ángulo de dilatación (Ψ)

3.6.Operacionalización de Variables

VARIABLES DEPENDIENTES			
<i>VARIABLES</i>	<i>DEFINICION DE LA VARIABLE</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>VALOR</i>
- Esfuerzo	- Acción de fuerzas sobre un área determinada de la sección del túnel.	$\sigma = \frac{F}{A}$ (Kg/cm ²)	Resistencia a la tracción mínima: $19.68 \frac{kg}{mm^2}$ Resistencia a la tracción mínima: $29.58 \frac{kg}{mm^2}$
- Deformación	Cambio de dimensión de la sección del túnel debido a los esfuerzos sobre este.	$\varepsilon = \frac{\Delta e}{e}$ (%)	La deformación a permitir es la mínima, que no provoque la falla de la estructura

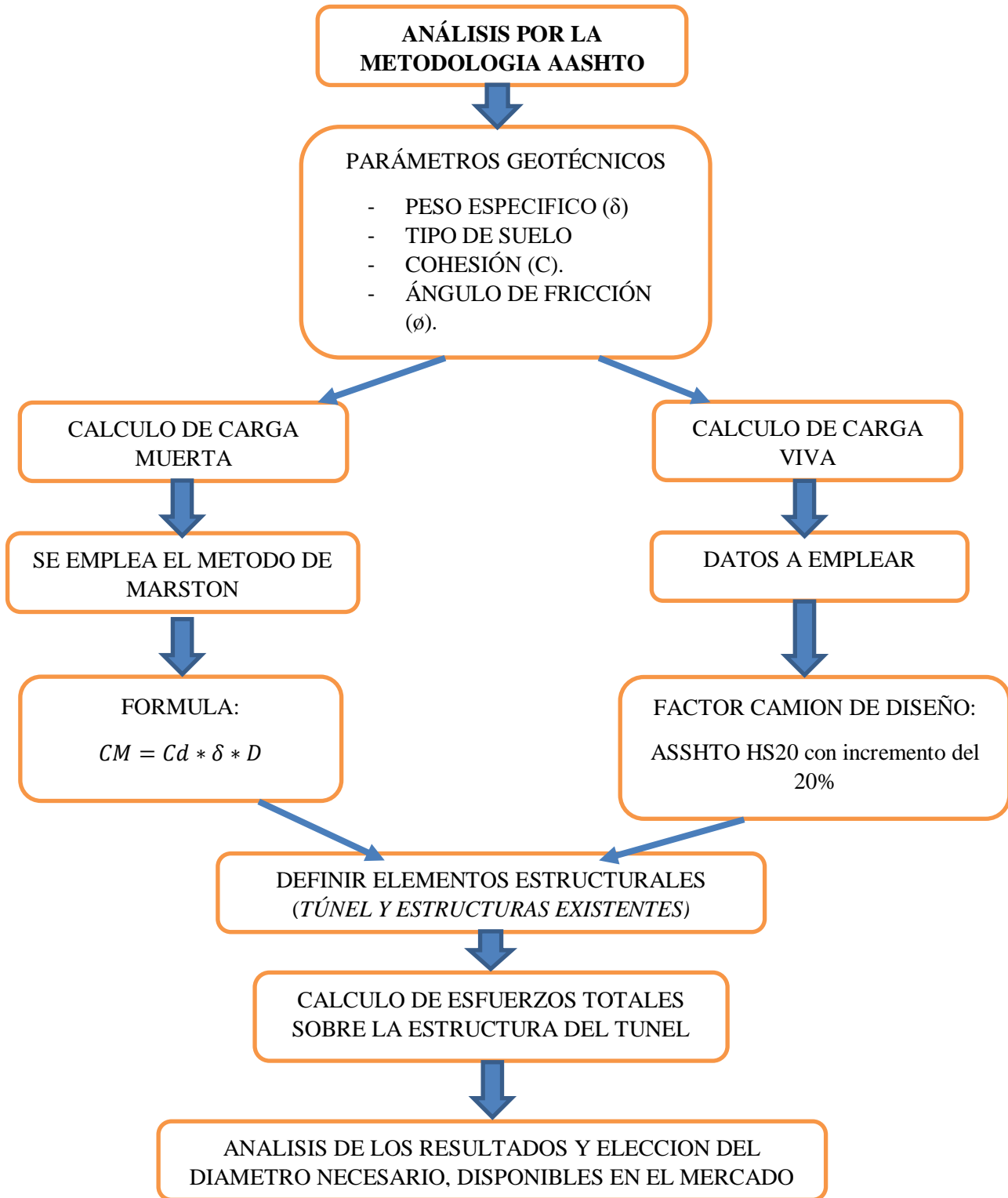
- Espesor de revestimiento	Es la anchura necesaria de la pancha del túnel para soportar los esfuerzos y evitar las deformaciones máximas.	e (mm)	$2.2 \leq e \leq 6.5$ Regido por la norma ASSHTO
- Factor de seguridad	Factor de reducción a la capacidad de soporte de la estructura.		$2 \leq F_s$

VARIABLES INDEPENDIENTES

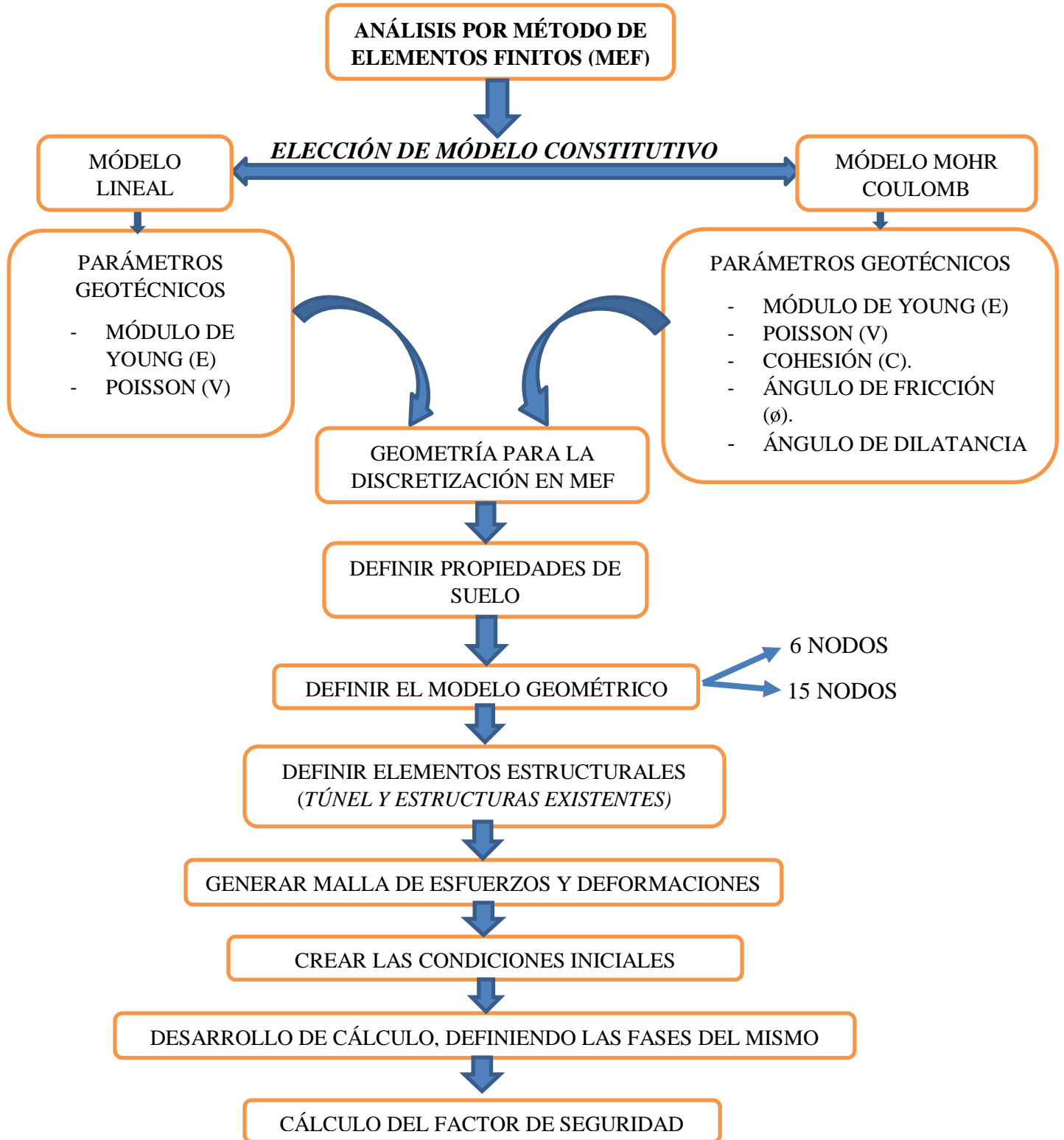
- Diámetro del túnel	Dimensión a elegir de acuerdo a la necesidad del proyecto.	(m)	$1.40 \leq D \leq 6.0$
- Factor camión	Factor de carga que define la norma ASSHTO para determinar la carga viva.	Kg/cm ²	Vehículo de diseño C-2 de acuerdo al reglamento nacional de vehículos.
- Coeficiente de reducción de Marston	Factor que se define de acuerdo al tipo de suelo.	Adimensional	
- Angulo de cohesión	Cualidad del suelo de mantener unidas a sus partículas como respuesta a las fuerzas internas.	(°)	
- Angulo de fricción	Es la propiedad de los suelos que define el ángulo de la pendiente de un conjunto del mismo material.	(°)	

- Módulo de Poisson	Constante elástica, muestra el estrechamiento de la sección de un material cuando este es estirado longitudinalmente.	$\nu = \frac{\epsilon_{seccion}}{\epsilon_{long}}$	
- Peso específico	Peso del suelo por una unidad de volumen	$\delta = \frac{W}{V}$ (kg/cm ³)	
- Módulo de elasticidad	Es un parámetro que muestra la relación de la aplicación de esfuerzos y la deformación unitaria en un material.	$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ (kg/cm ²)	Módulo de las planchas del tunnel liner es: 2100000 kg/cm ²
- Angulo de dilatancia	Propiedad del suelo que nos muestra el incremento de volumen frente a la aplicación de esfuerzos.		Según las especificaciones de la norma ASSHTO

3.7. Proceso de análisis con la metodología AASHTO



3.8. Proceso de análisis mediante el software Plaxis 2D



3.9. Materiales y equipo

- Equipo de protección personal para la exploración de campo.
- Equipo para ensayo de densidad de campo
- Equipo para ensayo de refracción sísmica
- Equipo para ensayo de MASW
- Kit de herramientas para excavación de calicatas.
- Equipo para ensayo de granulometría.
- Equipo para ensayo de límites de Atterberg
- Equipo para ensayo de corte directo
- Equipo para ensayo de análisis químico
- Equipo para ensayo de esfuerzos y deformaciones (edómetro).
- Horno para secado de muestras
- Microsoft Office 2013. En su versión original, se utilizará para redactar la tesis.
- AutoCAD V. 2015.
- Software Plaxis.

3.10. Procedimiento de Análisis

El procedimiento se puede dividir en tres grupos principales: Trabajo en campo, trabajo en laboratorio y trabajo en gabinete.

3.10.1. Trabajo en Campo

Con la exploración de campo se da inicio a la búsqueda de los distintos parámetros, que serán de suma importancia en nuestro objetivo principal, que es el de determinar el espesor del revestimiento del tunnel liner. En la exploración geotécnica se realizó lo siguiente:

- Excavaciones a cielo abierto (calicatas)

- Ensayo de densidad de campo.
- Ensayo de refracción sísmica.
- Ensayo de análisis de ondas superficiales en arreglo multicanal (MASW).

3.10.1.1. Excavación e identificación de calicatas

Los registros de las calicatas se han realizado de acuerdo a la norma ASTM D-2488. Se realizaron 02 excavaciones a cielo abierto, una en el ingreso a los túneles y otra a la salida de estos. En estas excavaciones se determinó la estratigrafía del terreno, así mismos se pudo obtener muestras inalteradas, las cuales fueron usadas en los distintos ensayos de laboratorio, para así obtener los parámetros que se requieran para el diseño del tunnel liner. Cada calicata alcanzó una profundidad de 6.00m.

Tabla 8: Resumen de Excavación de Calicatas

Ubicación	Profundidad (m)	Nivel Freático (m)
C-1	6.00	N.P.
C-2	6.00	N.P.



Figura 28: Inicio de excavación de calicatas y toma de muestras



Figura 29: Excavación y extracción de muestras

3.10.1.2. Ensayo de Densidad de Campo Método del Cono de Arena

Basado en la Norma- ASTM-D1556, se ha realizado este ensayo con el objetivo de determinar el estado de compacidad y consistencia de los suelos. En la calicata C-1 se ejecutaron 03 ensayos de densidad de campo, mientras que en la calicata C-2 se realizó 04 ensayos. El número de ensayos lo determina el cambio de estratigrafía que se puede observar al momento de la excavación.



Figura 30: Ensayo de densidad de campo

3.10.1.3. Ensayo de Refracción Sísmica y ensayo de Medición de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales (MASW)

Estos ensayos fueron realizados en horas de la madrugada, debido al alto tránsito vehicular que existe en la Av. Faucett. Se definieron 5 puntos y/o 5 líneas perpendiculares a lo largo de donde se proyectará el tunnel liner. En la siguiente figura se muestra la ubicación de los ensayos.



Figura 31: Ubicación de ensayos de Refracción Sísmica y MASW

Tabla 9: Coordenadas de los ensayos de Refracción Sísmica y MASW

LS	Longitud (m)	Coordenadas UTM (WGS 84) Zona 18S			
		Inicio		Final	
		Este	Norte	Este	Norte
LS 01	50	271642	8666522	271640	8666537
LS 02	50	271635	8666522	271630	8666572
LS 03	50	271627	8666522	271622	8666572
LS 04	50	2716416	8666521	271611	8666571
LS 05	50	271611	8666520	271605	8666571



Figura 32: Ensayo de refracción sísmica y MASW

La evaluación de campo y los resultados de ensayos de laboratorio han permitido caracterizar las condiciones físicas, de resistencia y rigidez de los suelos y materiales identificados que circundan el túnel liner. A partir de ensayos de corte directo en estado inalterado para el caso de limo arenoso ML, arena limosa SM y arena mala graduada SP y disturbado para el caso de las gravas limosas GM y gravas mal graduadas GP se han obtenido los parámetros de resistencia, los parámetros de rigidez han sido evaluados a partir de la sensibilidad de resultados de los ensayos de compresión edométría y ensayos geofísicos refracción sísmica y MASW.

En la geotecnia tradicionalmente se ha considerado que el módulo de cortante máximo (G_0) se puede utilizar únicamente en problemas dinámicos, como cimentación de maquinarias o sismos de muy bajas magnitudes. Sin embargo, en los últimos veinte años (Jardine et al., 1986; Batagglio y Jamiolkowsky, 1987; Burland, 1989; Fahey y Carter, 1993; Matthews et al., 1996; Mayne, 2001) se ha demostrado que valores de G_0 corregidos para niveles de deformación apropiados pueden ser de utilidad para problemas geotécnicos estáticos, como es el diseño de cimentaciones.

Conocidas la variación de la velocidad de onda de corte (V_S) y la densidad en un depósito de suelos, se puede calcular fácilmente el módulo de rigidez al cortante máximo o inicial (G_0) utilizando y con este valor se puede calcular el módulo de elasticidad ante pequeñas deformaciones o máximo (E_0) utilizando la siguiente ecuación

$$E_0 = 2G_0 (1+\mu) \approx 2.7 \rho V_S^2$$

Tanto G_0 como E_0 son valores máximos, para deformaciones angulares (γ) del orden de $10^{-4}\%$. Sin embargo, se ha encontrado que la deformación angular promedio en cimentaciones bien diseñadas es de alrededor de $10^{-1}\%$. Por lo tanto, para estimar asentamientos en suelos partiendo de parámetros elásticos máximos (G_0 y E_0), hay que reducirlos.

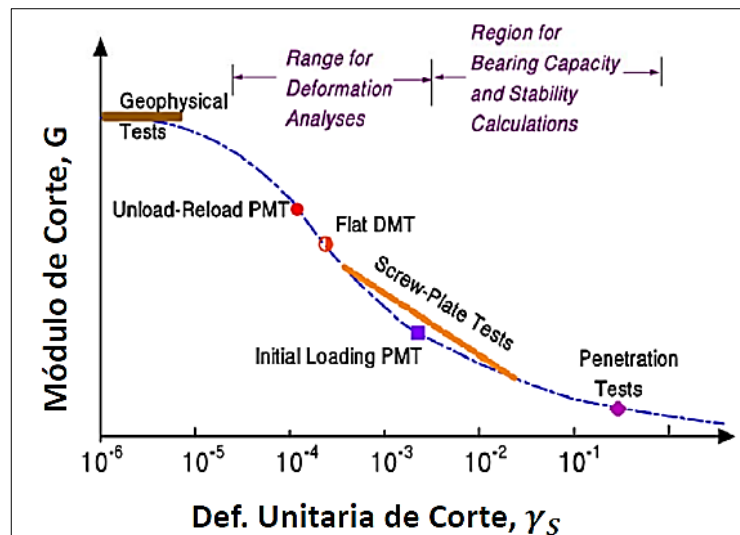


Figura 33: Curva de reducción del módulo de corte G , con la deformación

Fuente: Mayne, 2001

Para el análisis de asentamiento en arenas es conveniente que se use el módulo de cortante que corresponde a una deformación angular de 0.1% ($G_{0.1\%}$). Fahey y Carter (1993) y Mayne (2001) proponen un valor de $G_{0.1\%}$ del 20% de G_0 . De aquí tenemos que el módulo de elasticidad que se estima para las deformaciones en los suelos evaluados mediante los procedimientos geofísicos conservadoramente se ha adoptado el 10% del módulo E_0

Los parámetros Sísmicos y de Rigidez serán presentados en el Anexo E.

3.10.2. Trabajo en laboratorio.

Los trabajos de laboratorio se realizaron en conjunto con los técnicos de la empresa TCINGE.

De la calicata C-1 se tomaron 08 muestras y de la calicata C-2 se obtuvo 05 muestras. Estas muestras fueron extraídas a diferentes alturas. Las muestras obtenidas en la excavación de calicatas fueron sometidas a ensayos estándar tales como:

3.10.2.1. Análisis granulométrico por tamizado.

Este ensayo se realizó con el objetivo de determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de suelos.

La muestra a tomar para realizar este ensayo, es obtenida mediante cuarteo de la muestra total ya homogenizada, con cantidades de aproximadamente 115 g, para suelos arenosos y 65 g para suelos arcillosos, estas cantidades fueron pesados en una balanza con exactitud de 0.1 g.

La muestra seleccionada fue lavada para separar los finos de esta, luego lo obtenido se lleva al horno para ser secado a una temperatura de 110 ± 5 °C.

Finalmente, la muestra obtenida, ya seca, fue pesada para luego ser colocado en una serie de tamices (N° 4, 8, 10, 16, 20, 30, 50, 80, 100, 200) y se realizó el tamizado manual. De las porciones retenidas en cada malla, se determina el porcentaje de material retenido y con ello la curva granulométrica.

3.10.2.2. Limite Líquido

Se preparó la muestra seca, disgregándola con el mortero y pasarlo por la malla N°40 para obtener una muestra representativa de 250 gr aprox.

Se colocó el suelo pasante por la malla N° 40 en una vasija de evaporación y añadir cierta cantidad de agua para humedecer la muestra.

Se mezcló con la ayuda de la espátula hasta que el color sea uniforme y conseguir una muestra homogénea, la consistencia de la pasta debe ser pegajosa.

Se colocó una pequeña cantidad de masa húmeda en la parte central de la copa de Casagrande y se nivela la superficie, luego se pasa el acanalador por el centro de la copa para cortar en dos la pasta de suelo. La ranura debe apreciarse claramente y que separe completamente la masa del suelo en dos partes.

Luego se puso en movimiento la cazuela con ayuda de la manivela y suministrar los golpes que sean necesarios para cerrar la ranura generada anteriormente. Cuando se logró cerrar la ranura, se registró la cantidad de golpes y se tomó una muestra de la parte central de la copa para la determinación del contenido de humedad.

Se realizó todo este procedimiento con la cantidad de muestras necesarias para obtener puntos a diferentes contenidos de humedad.

3.10.2.3. *Limite plástico.*

Se trabajó con el mismo material preparado para determinar el límite líquido, aproximadamente 20gr. Luego se amasa el suelo y se deja que pierda humedad hasta una consistencia a la cual pueda enrollarse sin que se pegue a las manos, esparciéndolo y mezclándolo.

El rollito obtenido debe ser adelgazado en cada movimiento hasta que quede con un diámetro aproximado de 3.2 mm. La prueba continua hasta que el rollito empieza a rajarse y tiende a desmoronarse.

Luego, los rollitos fueron colocados en un recipiente de peso conocido y se pesó para determinar el contenido de humedad. Asimismo, se vuelve a realizar este procedimiento tomando otra porción de suelo, resultando el límite plástico el promedio de lo obtenido de las diferentes muestras.

3.10.2.4. *Contenido de humedad.*

El contenido de humedad se determinó en base a los resultados obtenidos con los ensayos de límites de Atterberg.

3.10.2.5. *Ensayos de corte directo.*

Se determinó la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada.

El proceso de realización de este ensayo comenzó con la introducción de la muestra de ensayo con mucho cuidado, luego se conectó el dispositivo de carga, ajustando el dial para medir tanto la deformación durante el corte, así como el cambio de espesor de la muestra y luego se determinó el espesor inicial.

Luego se procedió a realizar una consolidación inicial de la muestra bajo una fuerza normal adecuada. Luego de esto, se llena el depósito de agua hasta un nivel encima de la muestra, permitiendo el drenaje y una nueva consolidación de esta. El nivel de agua se debe mantener durante la consolidación y en las fases siguientes de corte.

Durante el proceso de consolidación, se registraron las lecturas de deformación normal, en los tiempos apropiados, antes de la aplicación de un nuevo incremento de esfuerzos. Cada incremento de esfuerzo debe durar hasta que se complete la consolidación primaria.

Se representó gráficamente las lecturas de deformación normal versus el tiempo.

Finalmente, luego de terminada la consolidación, se soltaron los marcos para permitir el corte de la muestra. Se aplicó la fuerza de corte lentamente para permitir la disipación completa del exceso de presión de poros.

Este procedimiento se realiza hasta que el esfuerzo de corte sea constante o hasta que se logre una deformación del 10% del diámetro o longitud original.

3.10.2.6. Ensayo de densidad máxima y mínima.

3.10.2.6.1. Densidad Máxima

Se tomó una muestra de suelo granular previamente secado al horno, garantizando la inexistencia de grumos.

Se utilizó el mismo molde para la determinación de la densidad máxima y mínima.

Luego se colocó el material en el molde patrón en 10 capas, aplicando con un martillo 100 golpes por capa a los lados del molde.

Después de cada ensayo, se volvió a mezclar cuidadosamente el suelo que quedó en el recipiente antes de realizar el siguiente ensayo.

Realizar tres ensayos para cada determinación de densidad máxima.

Luego de conocer el volumen y peso del recipiente, se obtuvo el peso neto del suelo y determinar la densidad.

Se utilizó la densidad máxima obtenida en estas tres determinaciones como la densidad máxima del suelo.

3.10.2.6.2. Densidad mínima

El suelo secado al horno y sin grumos se colocó en el molde distribuyéndolo con un movimiento circular cuidadoso; vaciando el material suficiente de tal manera que sobresalga levemente del molde y luego, con una regla, se retiró el exceso de material con el máximo cuidado obteniéndose el peso neto del suelo.

Se repitió dos veces el ensayo.

Se utilizó la menor densidad obtenida como valor de la densidad mínima del suelo.

3.10.2.7. Ensayo de compresión edométrica.

Una vez determinado el peso del anillo de bronce (M_r) de una muestra inalterada de suelo, se talla la muestra de ensaye con el anillo, el cual posee sus bordes cortantes que facilitan el proceso. Del suelo sobrante, se toman muestras representativas para determinar: humedad natural, gravedad específica de los sólidos y límites de consistencia.

Luego de obtenida la muestra de ensaye, de modo que las piedras porosas calcen dentro del anillo, se deberá rebajar la altura de la muestra. Utilizando el disco de moldeo por su lado de 2 mm., se empuja la muestra y al otro extremo, con un cuchillo se corta el suelo sobrante y se coloca un disco de papel filtro. A continuación, se pasa el disco de moldeo al otro extremo, empujando la muestra con el lado de 4 mm, repitiendo el procedimiento.

Por la cara recién cortada, se empuja la muestra con el disco de moldeo por su lado de 2 mm. y se determina la altura inicial (H_0) de la probeta y el peso del anillo más el suelo (W_1).

Sobre cada cara de la probeta, se coloca una piedra porosa saturada, las que deben ajustar perfectamente dentro del anillo. Luego se centra el conjunto dentro de la caja de bronce, se coloca el pistón o bloque de carga y se levanta el nivel de agua por encima de la piedra porosa superior.

Se ajusta el consolidómetro al aparato de carga y se aplica una carga de inicialización de 0,05 kgs/cm² para suelos blandos y de 0,10 kgs/cm² para suelos firmes. Sin retirar esta carga, se lleva a cero el dial de deformación. La compresión de la muestra consiste en aplicar el siguiente incremento de presiones o escalones de carga en kgs/cm²: 0,25 - 0,50 - 1,00 - 2,00 - 4,00 y 8,00. En cada una de ellas se registra la lectura del dial de deformación, en los siguientes tiempos: 0, 6, 15, 30 segundos; 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos y 1, 2, 4, 8, 16, 24 horas.

Finalmente, se descarga la muestra ensayada, se retira el consolidómetro y del anillo de bronce, se extrae el total de la muestra, se pesa (W_2) y se coloca a horno durante 24 horas para determinar el peso seco (W_3).

3.10.3. Diseño del espesor de tunnel liner mediante la metodología ASSHTO

3.10.3.1. Cálculo de cargas

Basándonos en el flujograma presentado líneas arriba, daremos inicio al diseño mediante la metodología AASHTO. Para estos cálculos de las cargas, donde emplearemos la siguiente formula: $P=P_L+P_d$

Donde:

P =carga externa sobre el sostenimiento del túnel

P_L = carga vertical debido a la sobrecarga de uso a cota de la clave del túnel

P_d = carga vertical debido a las cargas permanentes a cota de la clave del túnel

Para estimar el valor de la carga P_L , usaremos la recomendación de la AASHTO. La cual usa una carga de tráfico tipo H20. Los valores que toma esta carga, en función de su altura, se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 10: Valores de P_L para una carga de tráfico H20.

H(m)	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3
P_L (in²/in)	18.3	12.69	9.27	6.83	5.37	4.39	3.66

Fuente:(AASHTO, 2012)

De la tabla anterior asumimos una altura de relleno de 4 a 5 m sobre la clave del túnel. Se toma el valor de $P_i=3.66 \text{ kN/m}^2$.

Revisando el marco teórico la carga permanente P_d , puede ser estimada a partir de la fórmula:

$$P_d = C_d * W * D$$

Para el cálculo del peso específico W , asumiremos que la Estratigrafía presente en el terreno es homogénea, considerando que solo existe un tipo de suelo de grava limosa (GM, clasificación según SUCS). Entonces el peso específico de este tipo de suelo será: $W=20.40 \text{ kN/ m}^2$. Este dato se obtiene del estudio geotécnico realizado.

Para el cálculo de coeficiente de Marston C_d , usaremos el diagrama que propone la AASHTO. Entonces utilizado dicho diagrama podemos definir que el $C_d=2.20$, colocándose del lado más desfavorable asumiremos un $H=5\text{m}$.

Entonces aplicando la formula antes vista fijaremos que el valor de $P_d= 112.20 \text{ kN/ m}^2$

Así mismo una vez hallado este valor podemos determinar el valor de $P=3.66+112.20= 115.86 \text{ kN/ m}^2$

Pero como se ha descrito en este caso se encuentra la presencia de un terraplén que a su vez esta sostenido por muros de concreto armado los cuales ejercen una presión sobre el suelo y a su vez sobre la clave de los túneles.

Para ello se considera tanto el peso propio del muro, así como la carga máxima que éste puede ejercer debido a la ley de distribución trapezoidal de tensiones sobre el terreno generada por el momento flector al que está sometido el muro por el empuje horizontal de tierras.

Para la obtención de la tensión máxima ejercida por la cimentación de muro sobre el terreno, se sigue la siguiente expresión:

$$\text{Para: } e \leq B/6 \qquad \sigma_{max} = \frac{Q}{B} * \left(1 + \frac{6*e}{B}\right)$$

$$\text{Para: } e \geq B/6 \qquad \sigma_{max} = \frac{4}{3} * \frac{Q}{B-2e}$$

e = excentricidad ($e=M/Q$)

M = momento flector sobre la cimentación (valor de cálculo)

B = ancho de cimentación

Q =carga vertical sobre la cimentación (valor de cálculo)

σ_{max} = presión máxima transmitida por la cimentación

Realizando los cálculos correspondientes y aplicando la teoría de cimentaciones podemos llegar a los resultados siguientes.

Tabla 11: Presión transmitida por la cimentación del muro de contención.

Descripción	Valor
Q (Kn/m)	217.7
M (mkN/m)	96.5

e (m)	0.355
B (m)	2.6
σ_{max} (kN/m ²)	190.10

Entonces una vez calculado la presión que ejerce el muro sobre la clave del túnel vemos que esta es mayor que la carga $P=115.86 \text{ kN/ m}^2$. Mientras que la presión transmitida por el muro es de 190.10 kN/ m^2 , a la cual se debe añadir la carga debida al tráfico de 3.66 kN/ m^2 . Dando como carga final a usar para el dimensionamiento del túnel una presión de 193.8 kN/ m^2 .

3.10.3.2. Criterios de diseño.

La norma AASHTO se basa en los siguientes criterios de diseño:

- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la conexión empernada.
- Resistencia en el proceso de manipulación e instalación.

Estos criterios se procesaron de acuerdo a las fórmulas que se encuentran en la norma AASHTO y que líneas arriba han sido expresadas.

Para que el diseño sea válido tiene que cumplir con los 3 requisitos anteriormente mencionados.

3.10.4. Análisis mediante el software Plaxis 2D

Este caso se refiere al cruce de tuberías para el paso de agua en el distrito de La Perla Callao, este cruce se dará exactamente entre las avenidas Faucett y Colonial. Las dimensiones de las tuberías que cruzarán dichas avenidas son: HDPE 710mm y HD 1400mm. La primera corresponde a la línea de rebose y trabajara en gravedad, mientras que la segunda corresponde a la línea primaria de agua potable y trabajara en presión. Para la protección de estas tuberías se propone el diseño de túneles liner de diámetro de 1500mm (tubería de diámetro 710mm) y 2300mm (tubería de diámetro 1400mm). Además sobre dichos túneles se tendrá un bypass que esta sostenido por un terraplén que a su vez está confinado por muros de contención de concreto armado.

A continuación se muestra un esquema del perfil geotécnico donde se emplazaría estos túneles.

AVDA. ELMER FAUCETT

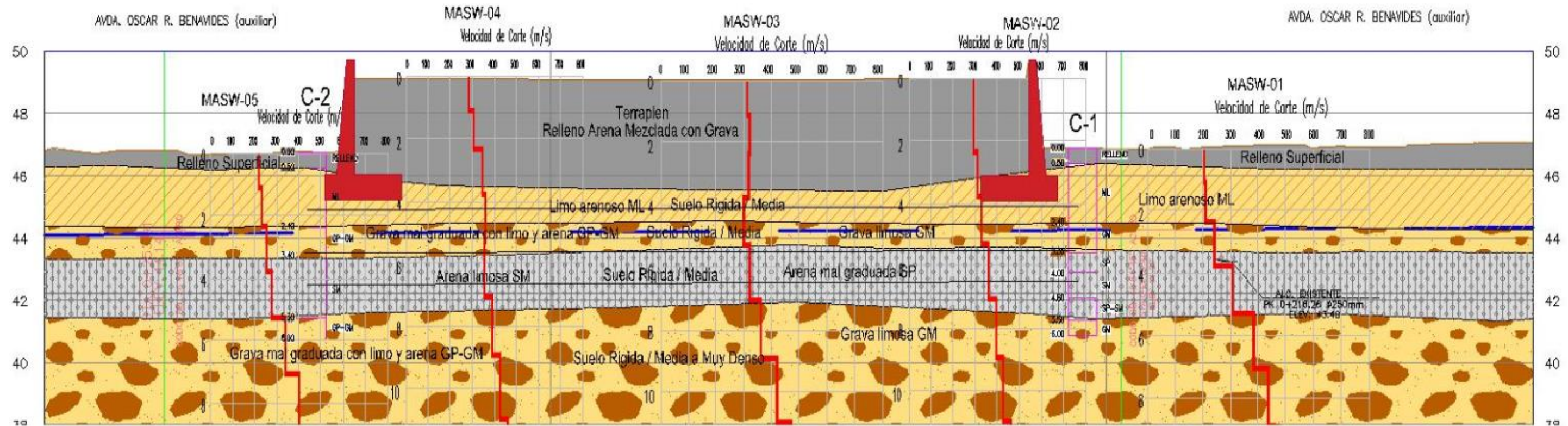


Figura 34: Perfil geotécnico

3.10.4.1. Consideraciones de diseño.

El diseño de las estructuras de acero corrugado instaladas por el método de tuneleo, se realiza según las restricciones de diseño que establece la norma AASHTO en su sección 12.13 (año 2004) y sección 15 de AASHTO (año 2002). El dimensionamiento de las planchas de revestimiento, referente al espesor, se determina a partir de los datos obtenidos en el estudio Geotécnico en el lugar de instalación del túnel, que nos va a definir:

- Profundidad donde estaría instalado el tunnel liner.
- Variedad de suelo existente y el cual vendría a ser el que soportará la estructura (tunnel liner).

Estos datos junto con las sobrecargas, ayudan a determinar las cargas que se van a generar sobre la estructura. Para suelos granulares de poca o nula cohesión, la carga es función del ángulo de fricción interna del suelo y del diámetro del túnel, mientras que para el caso de suelos cohesivos (arcillas), la carga depende de la resistencia al corte del suelo que está por encima de la corona del túnel.

Para definir el diámetro del tunnel liner, debemos tener en cuenta el uso para el cual se va a requerir la estructura, considerando siempre que la dimensión mínima recomendada (diámetro = 1,40 m) debe ser la apta para los trabajos internos.

3.10.4.2. Modelo constitutivo de los materiales.

Como se vio en el capítulo de marco teórico, los modelos más comunes a usar son el Lineal Elástico y el Mohr - Coulomb. En la presente investigación para los suelos, donde se pudo realizar la exploración geotécnica, usaremos el modelo constitutivo de Mohr – Coulomb, debido a que el comportamiento de dicho modelo es probablemente el más empleado ya que incorpora

de una manera elemental y directa la resistencia del material y su deformabilidad. Mientras que para el terraplén que sostiene el bypass, usaremos el modelo Lineal Elástico, ya que el comportamiento de dicho modelo requiere implementar menos parámetros geotécnicos, siendo así el modelo que más se ajusta para este tipo de suelos (terraplén), donde sus parámetros geotécnicos son poco conocidos. En la figura siguiente se muestra los modelos constitutivos que ofrece el Plaxis 2D.

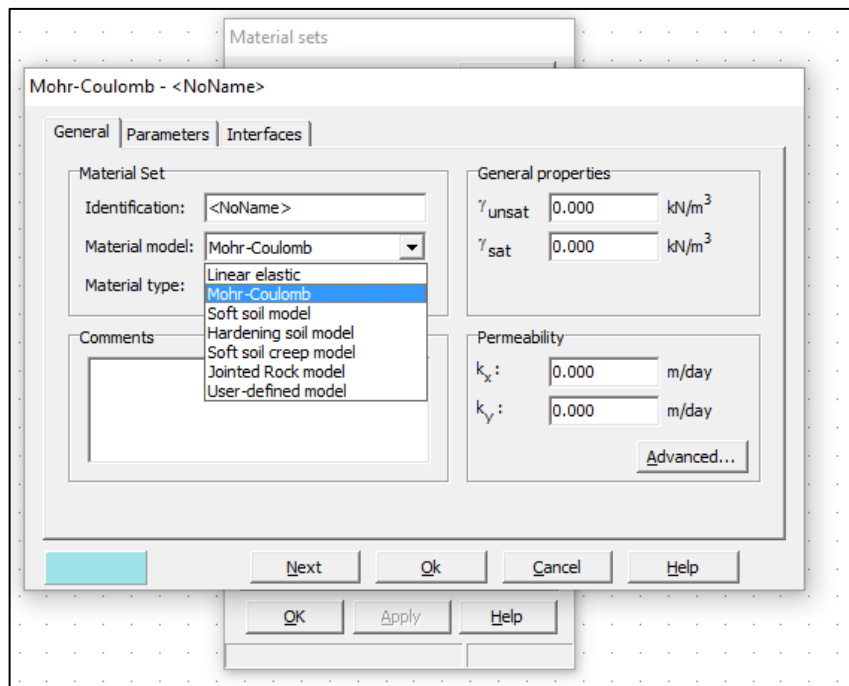


Figura 35: Interfaz de ingreso de datos

3.10.4.3. Cálculo estructural.

La gran resistencia estructural de tunnel liner se debe a la resistencia del área de acero y al confinamiento del suelo circundante, el que al impedir la deformación de la estructura, induce un estado tensional predominantemente a compresión, razón por la que no sólo es importante la calidad del tubo, sino también un adecuado relleno del espacio resultante entre la estructura y la excavación. Antes de iniciar con el análisis a través del MEF, realizaremos un pre

dimensionamiento del espesor de las planchas, para lo cual en el diseño estructural se verifican 3 puntos importantes:

3.10.4.3.1. Resistencia a Compresión

Debido a que los túneles se emplazaran debajo de un bypass vehicular, analizaremos la presión que ejercen las llantas de los vehículos. Para esto basándonos en Decreto Supremo N° 058-2003-MTC, el vehículo considerado para este caso es el C-2 de acuerdo al reglamento nacional de vehículos. La presión de contacto de las llantas delanteras es 4.9 Kg/cm^2 y de las llantas posteriores 3.87 Kg/cm^2 .

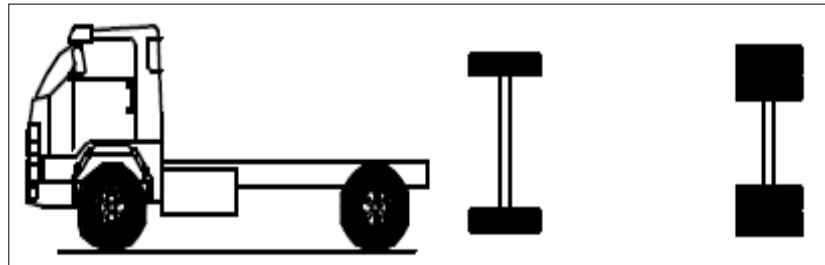


Figura 36: Configuración vehicular del camión C-2
Fuente:(MTC, 2003)

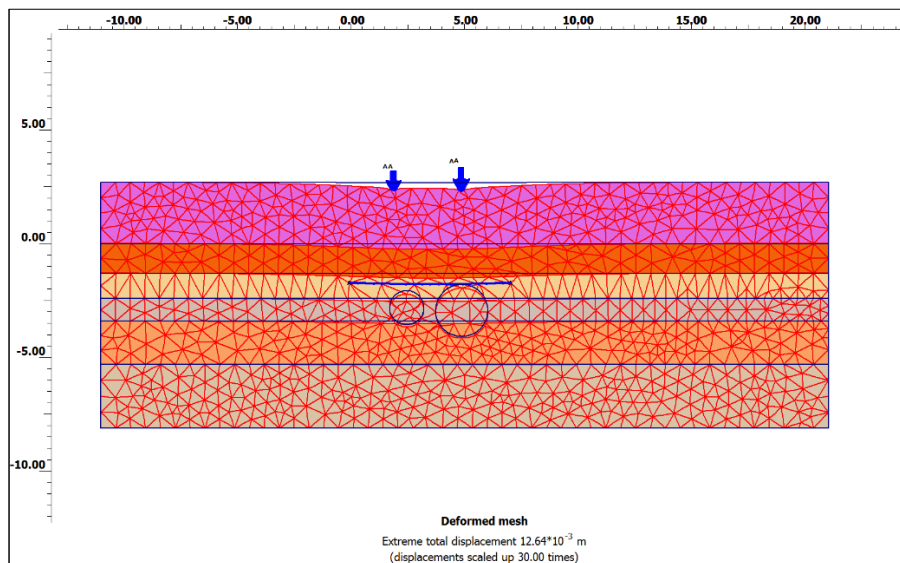


Figura 37: Deformación de la malla del modelo en elementos finitos.

En la figura 37, la malla mostrada se obtiene una vez asignados los parámetros geotécnicos y los modelos constitutivos correspondientes de los materiales.

La ventaja que brinda el Plaxis 2D, es que da la opción de determinar los esfuerzo y deformaciones en cualquier punto del sistema. Como se muestra en la figura 38, elegimos dos puntos de control C y D, los cuales están ubicados en la clave de los túneles.

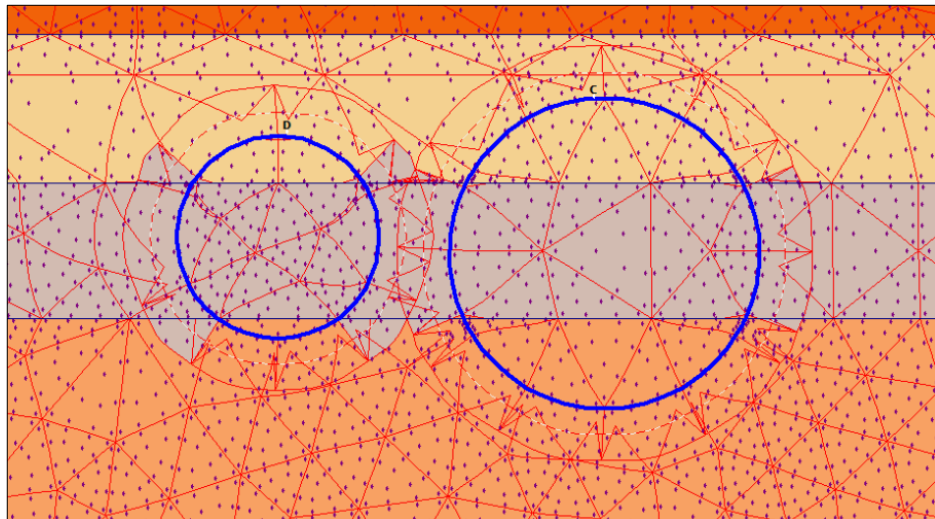


Figura 38: Puntos de control para el incremento de esfuerzos del camión C-2 en la clave del tunnel liner.

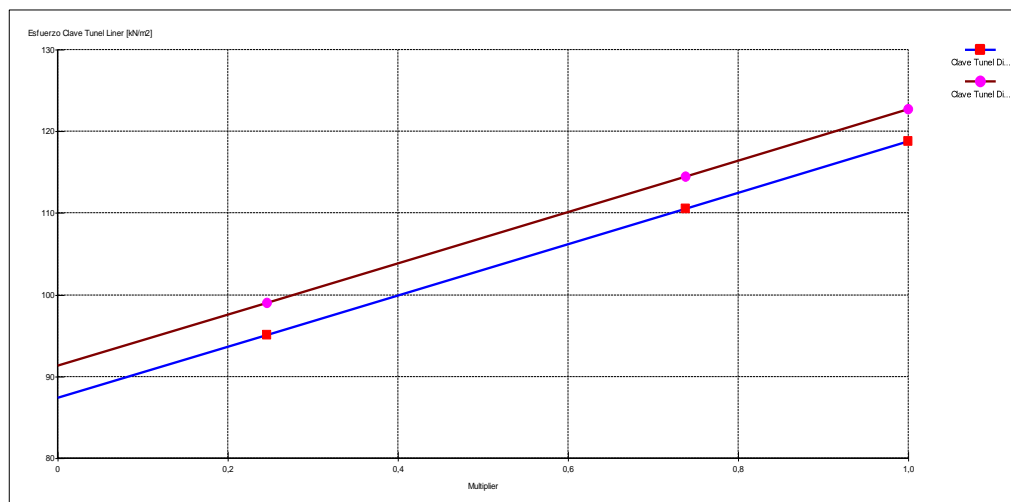


Figura 39: Incremento de esfuerzos en la clave del tunnel liner, debido a la carga del camión C-2 y sobrecarga del suelo por encima de la clave del túnel.

De acuerdo a la evaluación del incremento de esfuerzos del camión C-2 y la sobrecarga del suelo por encima de la clave del tunnel liner, se determinó que los esfuerzos en la clave del túnel de 2300 mm de diámetro corresponden a 118.70 KN/m², así también, los esfuerzos en la clave del túnel de 1500 mm de diámetro corresponden a 112.64 KN/m². Por tanto, se considera para el análisis correspondiente el esfuerzo mayor de 118.70 KN/m².

Se utilizó planchas de acero de 2 pestañas (2-Flange plate), traslapadas. A continuación se indica las propiedades mecánicas de las planchas.

Tabla 12: Resistencia a compresión túnel de 2300 mm de diámetro.

Descripción		Valor	Unidad
Presión de diseño sobre la clave del tubo	(P)	118,7	KN/m ²
Diámetro o luz del túnel	(D)	2,3	m
Empuje generado por la carga total compresión axial	(T)	136,51	KN/m
Espesor de plancha de tunnel liner	(e)	4	mm
Área efectiva de sección transversal de la placa de revestimiento	(A)	0,54	cm ² /cm
Radio de giro de la sección	(r)	1,55	cm
Factor de rigidez del suelo	(k)	0,22	
Fuerza de tracción mínima especificada	(f _u)	290	MPa
Módulo de elasticidad del acero	(E)	205940.65	MPa
Tensión de pandeo sin exceder la fuerza de fluencia	(f _{cr})	280.933	MPa
F.S > 2			

Tabla 13: Resistencia a compresión túnel de 1500 mm de diámetro

Descripción		Valor	Unidad
Presión de diseño sobre la clave del tubo	(P)	118,7	KN/m ²
Diámetro o luz de la tubería	(D)	1.5	m
Empuje generado por la carga total compresión axial	(T)	89.025	KN/m

Espesor de plancha de la tubería	(e)	4	mm
Área efectiva de sección transversal de la placa de revestimiento	(A)	0,54	cm ² /cm
Radio de giro de la sección	(r)	1.55	cm
Factor de rigidez del suelo	(k)	0,22	
Fuerza de tracción mínima especificada	(f _μ)	290	Mpa
Módulo de elasticidad del acero	(E)	205940	MPa
Tensión de pandeo sin exceder la fuerza de fluencia	(f _{cr})	286,144	MPa
F.S > 2			

3.10.4.3.2. Resistencia de la conexión empernada.

Como se ha visto en el marco teórico, esta depende del espesor de la plancha a utilizar, debiendo cumplir la condición que se muestra en el ítem 2.2.6.2

Tabla 14: Resistencia de la conexión empernada, túnel D=2300mm

Descripción		Valor	Unidad
Empuje generado por la carga total compresión axial	(T)	136,51	KN/m
Resistencia nominal de la costura	(R _j)	802.45	KN/m
Factor de seguridad de la costura	(F _{sj})	3	

$$T \leq \frac{R_j}{FS_j} = 267.48$$

Tabla 15: Resistencia de la conexión empernada túnel de 1500 mm de diámetro

Descripción		Valor	Unidad
Empuje generado por la carga total compresión axial	(T)	89.025	KN/m
Resistencia nominal de la costura	(R _j)	802.45	KN/m
Factor de seguridad de la costura	(F _{sj})	3	

$$T \leq \frac{R_j}{FS_j} = 267.48$$

Realizando el análisis de las tablas anteriores podemos decir que el espesor de la plancha es el ideal ya que cumple con la condición propuesta. Además se puede recalcar que el dato de R_j , son datos establecidos por la AASHTO.

3.10.4.3.3. Rigidez a la manipulación

También es una condición que fue revisada en el marco teórico, donde se observa que depende del módulo de elasticidad, momento de inercia y diámetro del túnel.

Tabla 16: Rigidez a la manipulación túnel de 2300 mm de diámetro

Descripción		Valor	Unidad
Módulo de elasticidad del acero	(E)	2.9E+07	PSI
Momento de inercia de la placa	(I)	0,079	Pulg4/pulg
Diámetro de la tubería	(D)	90.551	Pulg
Rigidez mínima		287.769	Psi * pulg.

Tabla 17: Rigidez a la manipulación túnel de 1500 mm de diámetro

Descripción		Valor	Unidad
Módulo de elasticidad del acero	(E)	2.9E+07	PSI
Momento de inercia de la placa	(I)	0,079	Pulg4/pulg
Diámetro de la tubería	(D)	59.0551	Pulg
Rigidez mínima		676.578	Psi * pulg

Entonces una vez hecha la evaluación y de haber cumplido con las condiciones que expresa la AASTHO. Iniciaremos el análisis a través de elementos finitos mediante el software de Plaxis 2D, tomando como valores iniciales de espesores de plancha y diámetros como se muestra a continuación.

Tabla 18: Dimensionamiento mínimo de la planchas para los túneles liner

Diámetro (mm)	Espesor (mm)
1500	4
2300	4

Sabiendo que existen estructuras, que pueden influir de manera considerable al momento de la ejecución de obras como estas, no es conveniente conformarse con estos resultados. Es por eso que este procedimiento analítico, será verificado mediante el análisis numérico de elementos finitos, el cual considera todas las características geotécnicas, tales como resistencia y rigidez, de los diferentes depósitos de suelo registrados y que circundan el tunnel liner, así como las condiciones geométricas de las infraestructuras y cargas de servicio, para determinar la estabilidad a la deformación de las planchas que revisten el tunnel liner.

3.10.4.4. Formulación del modelo

Tomando como referencia el flujograma presente en el ítem 3.8. Se dio inicio al modelado discretizando la geometría de elementos finitos, para luego determinar un modelo geométrico. Consiguientemente se asignó las propiedades a los materiales, teniendo en cuenta el tipo de modelo constitutivo que se le asignará (Mohr Coulomb o Lineal Elástico); luego de haber afinado la malla se procede con las condiciones iniciales del modelado, para continuar con la definición de las fases, teniendo como parte final el cálculo del factor de seguridad y el cálculo de los máximos desplazamientos.

3.10.4.4.1. Geometría para la discretización en elementos finitos.

Teniendo en cuenta el análisis de un túnel utilizaremos las recomendaciones del Profesor Dr. Ing. Hermut Meibner en su artículo de 1996 (Tunnelbau unter tage) tal como se describe en la figura siguiente para determinar los contornos del modelo.

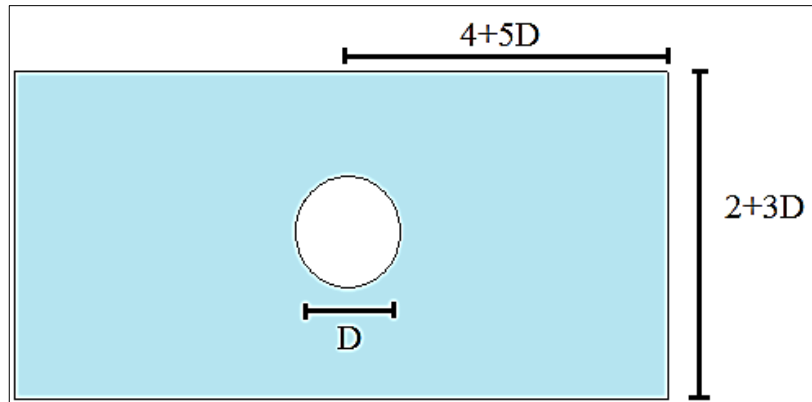


Figura 40: Geometría del modelo para la discretización de elementos finitos (Meibner H., 1996).

Partiendo de este modelo los valores obtenidos para definir la geometría del caso de estudio con un túnel de diámetro (D) igual a 2.3 metros, para su altura tenemos un $H= 8.9$ m, pero se eligió una altura de tres veces el diámetro. Longitudinalmente se tiene desde el punto medio del túnel al extremo del modelo una longitud $L= 15.5$ m.

3.10.4.4.2. Modelo geométrico.

Habiendo determinado la geometría se procede a definirla en el input del programa, se simula con un modelo de deformación plana (plain strain) como se puede observar en la figura, el cual se ha considerado adecuado para los modelos al suponer que las propiedades del túnel, la vía férrea y los materiales que conforman el subsuelo no varían en el eje z, debido a que este tipo de modelo se utiliza en el caso de geometrías con una sección transversal (más o menos) uniforme para las que pueda suponerse que los correspondientes estados tensionales y de cargas son uniformes a lo largo de una determinada longitud perpendicular a la sección transversal (dirección z). Los desplazamientos y deformaciones en la dirección z se consideran nulos. Sin embargo, se tienen en cuenta completamente los esfuerzos en la dirección z.

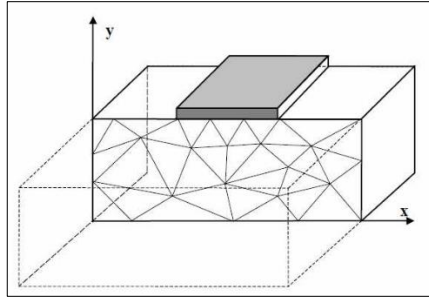


Figura 41: Modelo deformación plana.

En el mallado del problema se han escogido elementos de 15 nodos debido a que proporciona una interpolación de cuarto orden para los desplazamientos y la integración numérica implica doce puntos de Gauss o puntos de tensión lo cual indica que este tipo de elementos proporcionan más exactitud en el análisis. Luego de crear las dimensiones del modelo se coloca el túnel con un diámetro dicho anteriormente de 2300 mm y 1500 mm. Además de esto se incluye la presión de las llantas para un camión C-2, 3.87 Kg/cm² para eje simple tándem y 4.9 Kg/cm² para eje simple, también la carga de la cimentación del muro de contención.

Una vez definido el modelo como se muestra en la figura siguiente se asignan las propiedades de los materiales, suelo, túnel, y cargas.

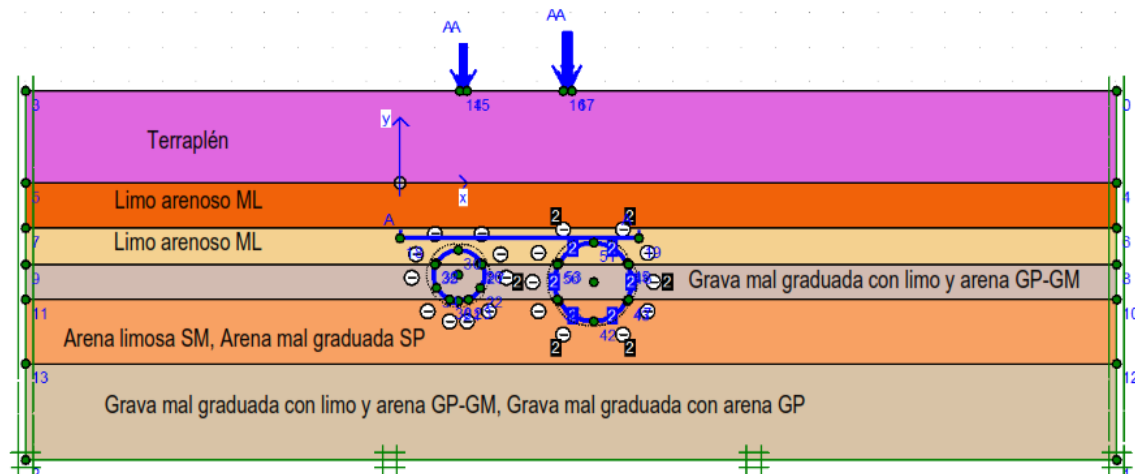


Figura 42: Modelo numérico base, empleado para la simulación.

3.10.4.4.3. *Propiedades de los materiales.*

El suelo consiste en una formación estratificada compuesta por limos arenosos ML hasta los 2.40 m, para luego intercalarse con grava mal graduada con limo y arena GP-GM y grava limosa GM, hasta los 3.40 m, posteriormente continua arena limosa SM y arena mal graduada SP, hasta los 5.30 m de profundidad. Finalmente se presenta la grava mal graduada con limo y arena GP-GM con grava mal graduada con arena GP hasta los 6.0 m. Los materiales mencionados se encuentran modelados constitutivamente por Mohr Coulomb. El terraplén que de acuerdo a los ensayos geofísicos, se encuentra conformado por materiales granulares como gravas y arenas, el modelo constitutivo será elástico lineal.

Los elementos estructurales como las planchas metálicas para el túnel de 2300 mm y 1500 mm de diámetro, son representados a través de elementos tipo placa, debido a que este tipo de elementos modela el comportamiento mecánico de los elementos estructurales. Para cuantificar el peso de la estructura se ha considerado el efecto de las cargas vehiculares y muro de contención, las cuales son aquellas que actúan durante toda la vida en la estructura.

Las propiedades de las planchas metálicas son representadas en el modelamiento numérico mediante las siguientes relaciones:

- Rigidez a la Flexión

$$EI = E \cdot \frac{h^3 \cdot b}{12} (b=1 \text{ m})$$

- Rigidez Axial

$$EA = E \cdot h \cdot b (b=1 \text{ m})$$

- Espesor del Elemento

$$d = h = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}}$$

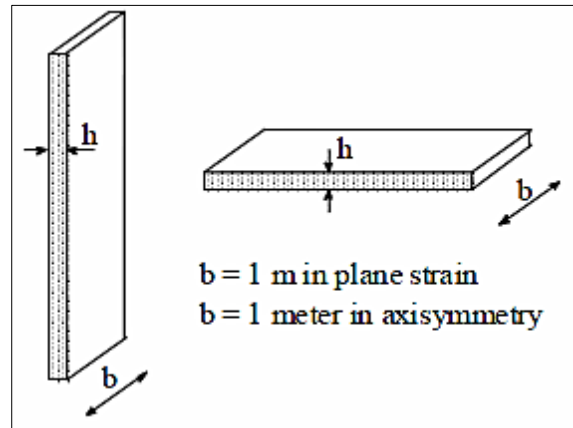


Figura 43: Modelamiento de elementos placa

Fuente: (Plaxis Models Manual, 2018)

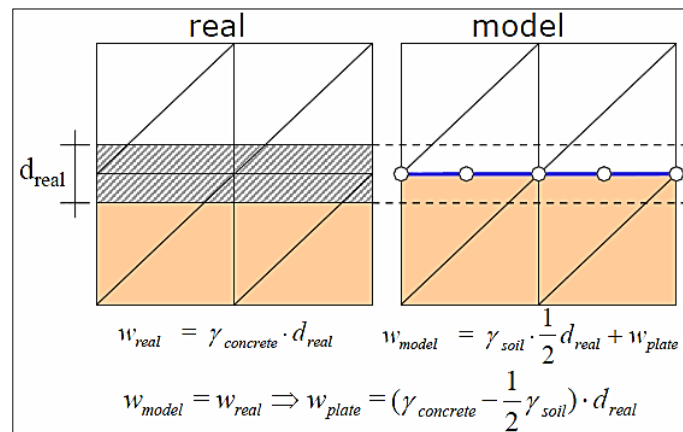


Figura 44: Modelamiento del peso de las placas

Fuente: (Plaxis Models Manual, 2018)

Tabla 19: Propiedades de los materiales del suelo

Mohr-Coulomb		Limo arenoso ML 0.00 - 1.85	Limo arenoso ML 1,85 - 2,40	Grava mal graduada con limo y arena GP- GM 2.40 - 3.40	Arena limosa SM 3.40 - 5.30	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM grava mal graduada GP 5.30 - 6.00
Type		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat}	[kN/m ³]	15,3	14,8	20,8	15,2	21
γ_{sat}	[kN/m ³]	15,3	14,8	20,8	15,2	21
k_x	[m/day]	0	0	0	0	0
k_y	[m/day]	0	0	0	0	0
e_{init}	[-]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
c_k	[-]	1,00E+15	1,00E+15	1,00E+15	1,00E+15	1,00E+15
E_{ref}	[kN/m ²]	25024	10726,9	40260	15702,2	71400
ν	[-]	0,3	0,3	0,2	0,25	0,2
G_{ref}	[kN/m ²]	9624,615	4125,731	16775	6280,88	29750
E_{oed}	[kN/m ²]	33686,154	14440,058	44733,333	18842,64	79333,333
c_{ref}	[kN/m ²]	58	27	16	18	16
φ	[°]	36,9	36,7	38,7	34,2	38,7

Tabla 20: Propiedades de los materiales en el terraplén

	Linear Elastic	Terreplen Faucett
Type		Drained
γ_{unsat}	[kN/m ³]	22,5
γ_{sat}	[kN/m ³]	22,5
k_x	[m/day]	0
k_y	[m/day]	0
e_{init}	[-]	0,5
c_k	[-]	1,00E+15
E_{ref}	[kN/m ²]	55280
ν	[-]	0,2
G_{ref}	[kN/m ²]	23033,333
E_{oed}	[kN/m ²]	61422,222

Tabla 21: Propiedades de la plancha de tunnel liner, para diametro de 1500mm y 2300mm

Identification	EA	EI	w	n	Mp	Np
	[kN/m]	[kNm ² /m]	[kN/m/m]	[-]	[kNm/m]	[kN/m]
Plancha Metálica 4 mm	840000	1,12	0,08	0,15	1E+15	1E+15

Después de haber asignado las propiedades de los materiales y las condiciones de contornos se procede a generar la malla de elementos finitos con una tosquedad fina como se puede observar en la figura siguiente, donde se aprecia las particiones del terreno discretizadas en un conjunto de triángulos.

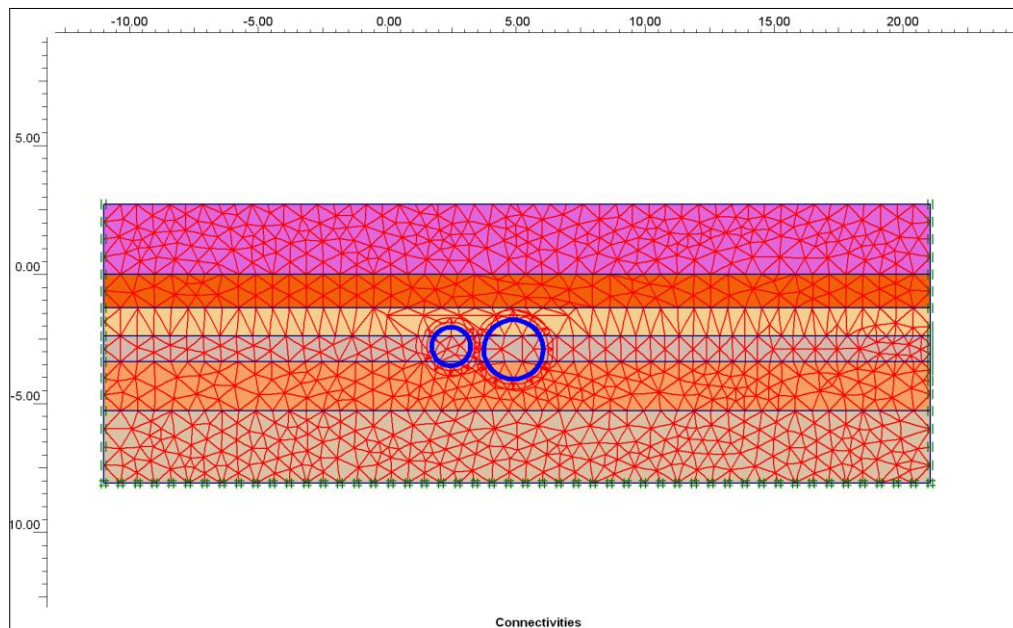


Figura 45: Malla fina de elementos finitos del modelo para el tunnel liner de 1500 mm y 2300 mm de diámetro.

3.10.4.4. Condiciones iniciales

Luego de generar la malla se procede a crear las condiciones iniciales. El cálculo se hace en condiciones drenadas ya que el suelo está parcialmente saturado. Las presiones de agua no se toman en cuenta por lo cual el nivel freático se coloca en el fondo del modelo. Además se generan

las tensiones iniciales efectivas del suelo sin tener en consideración ningún tipo de elemento que afecte su estado de reposo, tomando en consideración la fórmula de Jaky ($K_0 = 1 - \text{sen}\phi$). Las tensiones iniciales se pueden observar en las siguientes figuras.

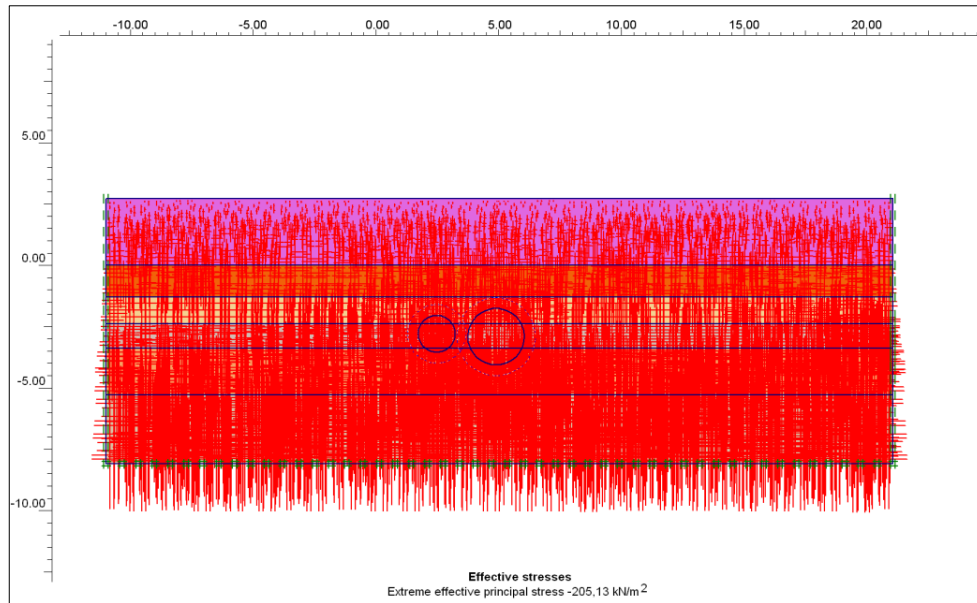


Figura 46: Tensiones iniciales de los suelos que circundan el tunnel liner de 1500 mm y 2300 mm de diámetro.

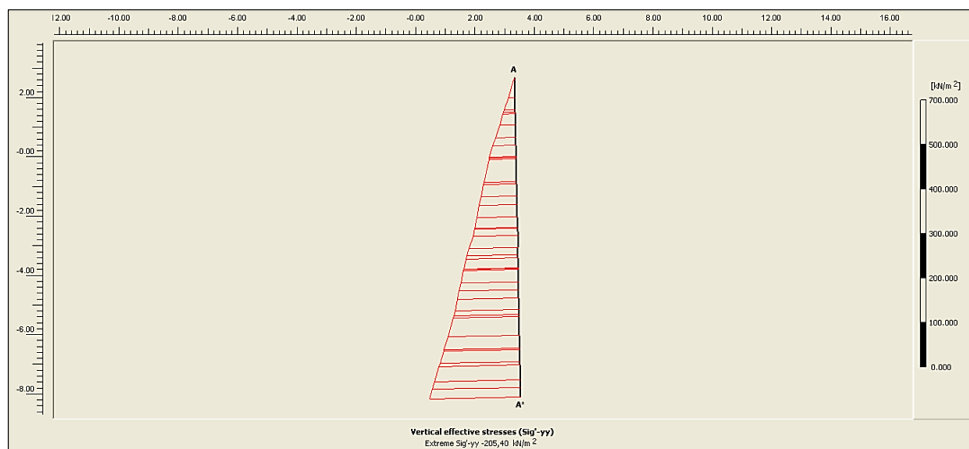


Figura 47: Incremento de esfuerzos verticales, condiciones iniciales sin carga. Esfuerzo Máximo vertical 2.05 Kg/cm².

3.10.4.4.5. Fases de cálculo.

Se procede a calcular el efecto causado al paso de un camión C-2 sobre el medio, además de esto se considera la presión que ejerce el muro de contención. El cálculo se divide en 3 fases. Las tres son plásticas. En la fase I solo se tendrá en cuenta las cargas de servicio, mientras que en la fase II se simulará la excavación del túnel de diámetro de 2300mm, para finalizar con la fase III activando el segundo túnel de diámetro de 1500mm. En la fase III ya se tendrá la activación de las fases anteriores, teniendo entonces el funcionamiento total del modelado. El programa brinda la oportunidad que las fases funcionen de manera individual y/o en conjunto, haciendo del modelado un tanto dinámico. Cabe recalcar que estas fases se aplicaran tanto en la entrada como la salida de los túneles.

Tabla 22: Fases constructivas

Fases	
FASE 1:	Cargas de servicio
FASE 2:	Excavación de túnel de 2300mm
FASE 3:	Excavación de túnel de 1500mm
Factor de seguridad	

Partiendo de la fase inicial o condiciones iniciales se definen las siguientes fases a continuación:

3.10.4.4.6. Fase I – Ingreso y salida del tunnel liner: carga vehicular y muro de contención.

En esta fase se consideran las cargas de servicio; es decir, se activan las cargas que representan la presión de llanta para el eje simple tándem 3.87 Kg/cm² y para el eje simple de 4.9 Kg/cm².

En las siguientes figuras, podemos observar como el modelo ha sido afectado por las cargas vehiculares.

a) Ingreso de túnel.

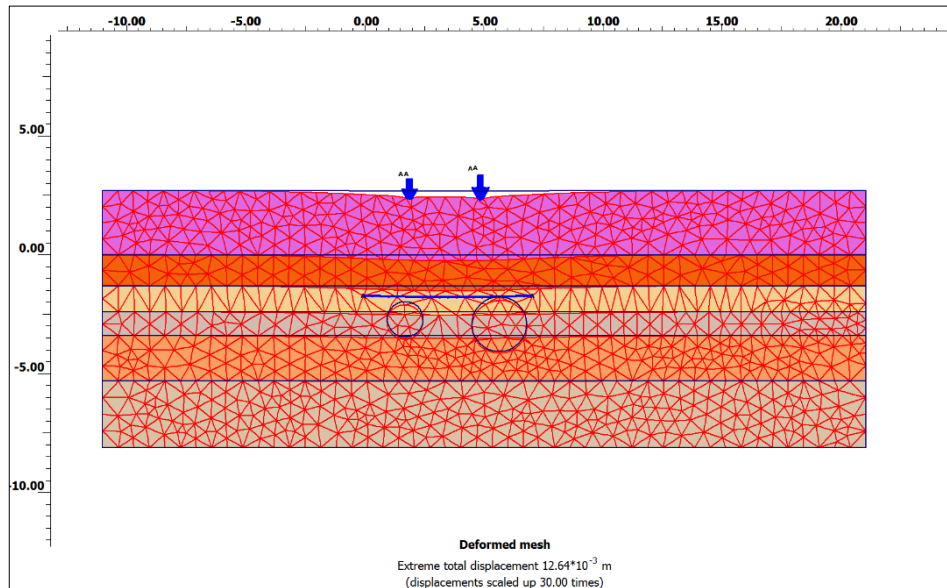


Figura 48: Ingreso Túnel. Desplazamiento total en la superficie 12.64 mm.

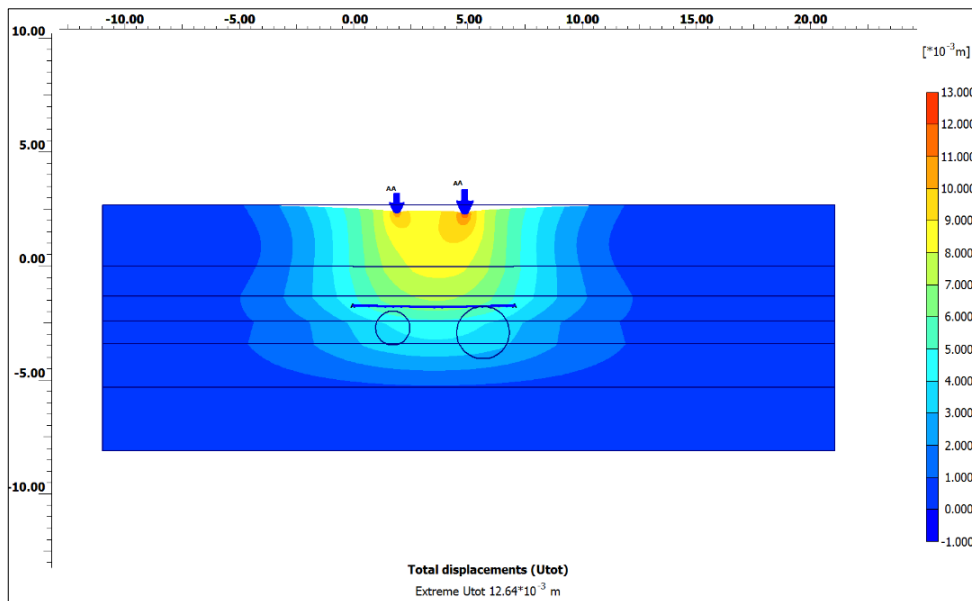


Figura 49: Ingreso Túnel. Se aprecia los desplazamientos en profundidad.

b) Salida de túnel.

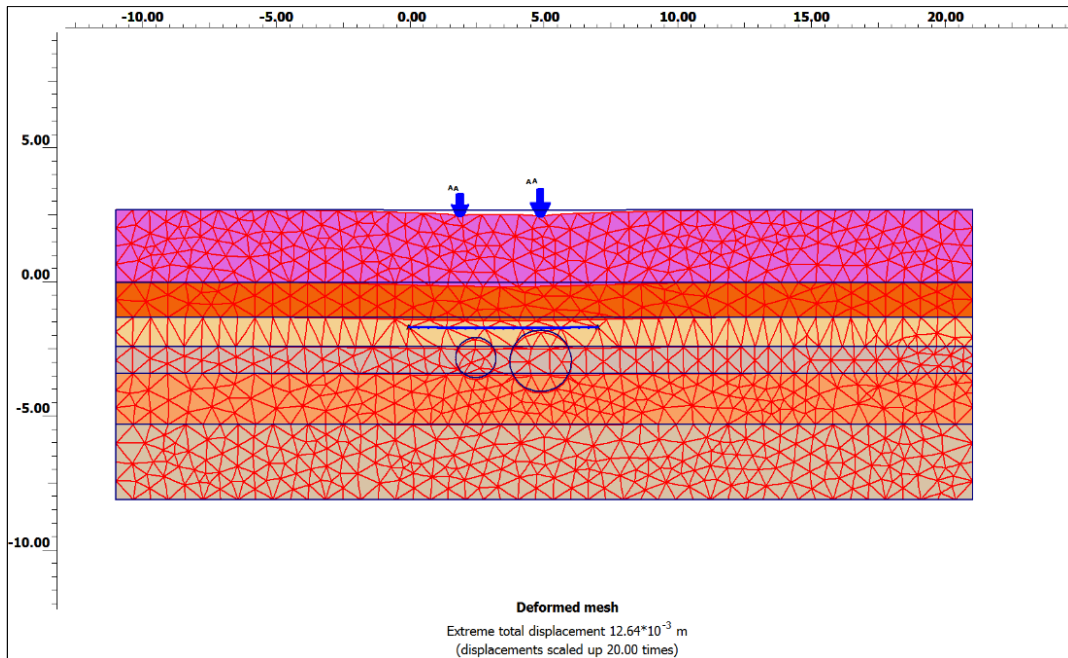


Figura 50: Salida túnel: Desplazamiento total en la superficie 12.64 mm.

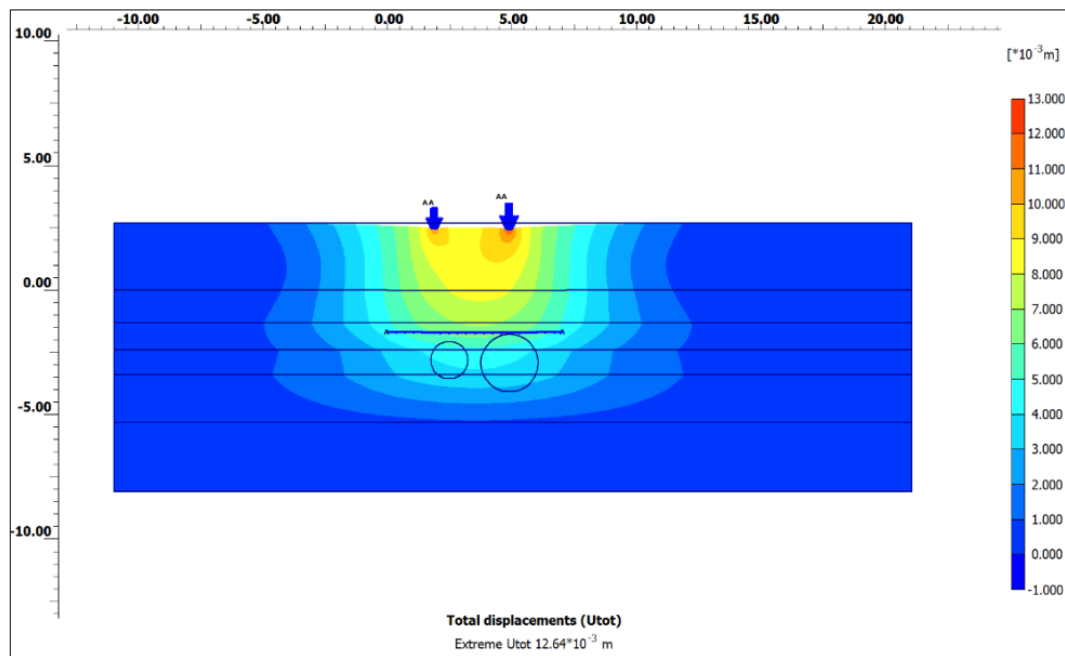


Figura 51: Salida Túnel. Se aprecia los desplazamientos en profundidad.

3.10.4.4.7. Fase II – Ingreso y salida del tunnel liner: Colocación de planchas metálicas diámetro del túnel 2300mm.

En esta fase se considera la excavación del tunnel liner y la colocación de las planchas metálicas de 2300 mm de diámetro. En esta sección se va representar el comportamiento en ambas posiciones (ingreso y salida), para que se encuentren en el marco de la fase considerada.

a) Ingreso de túnel.

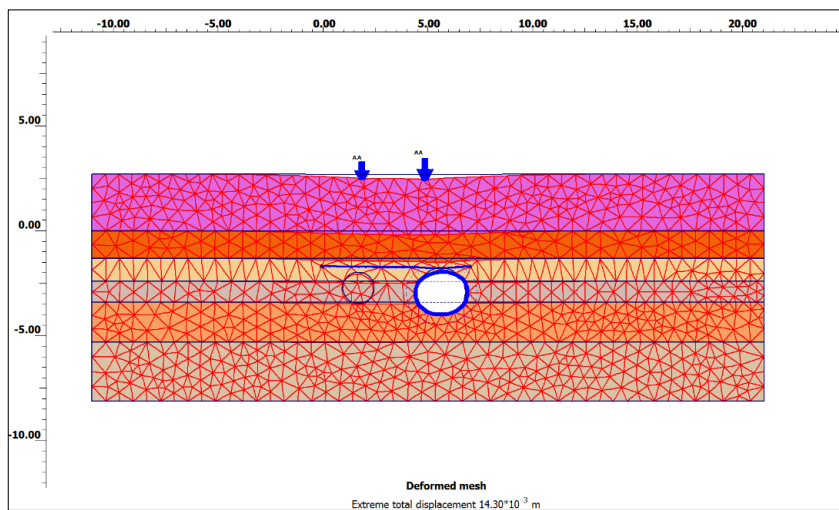


Figura 52: Ingreso Tunnel liner. Se aprecia la malla deformada a causa del camión C-2

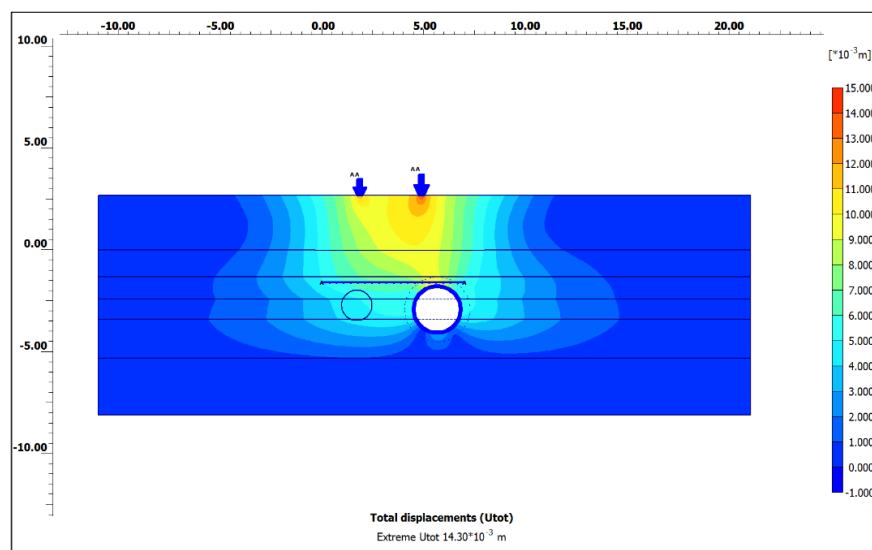


Figura 53: Ingreso Tunnel liner: Desplazamiento máximo en la superficie 14.30mm.

En la figura 53, se aprecia la incidencia del desplazamiento del suelo en profundidad hasta la clave del tunnel liner.

En las figuras 54 y 55 se presenta el comportamiento de los desplazamientos en el ingreso de tunnel liner de diámetro de 2300mm, también en la superficie del terreno y en la cimentación del muro de contención.

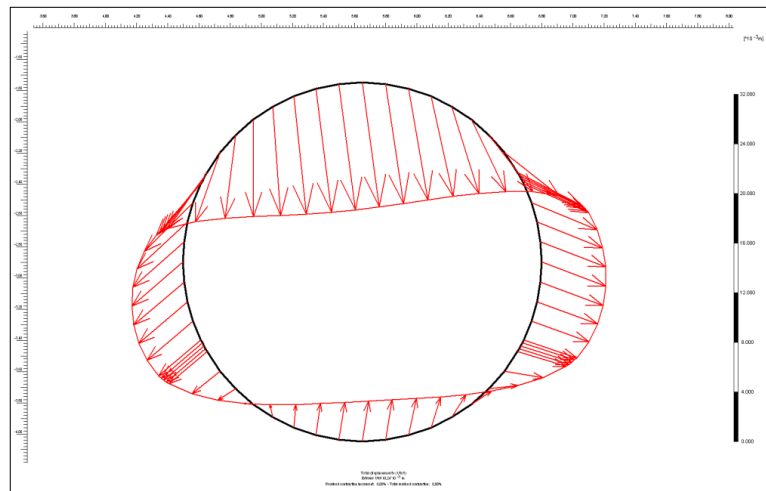


Figura 54: Ingreso Tunnel liner: Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 2300 mm igual a 10.24mm

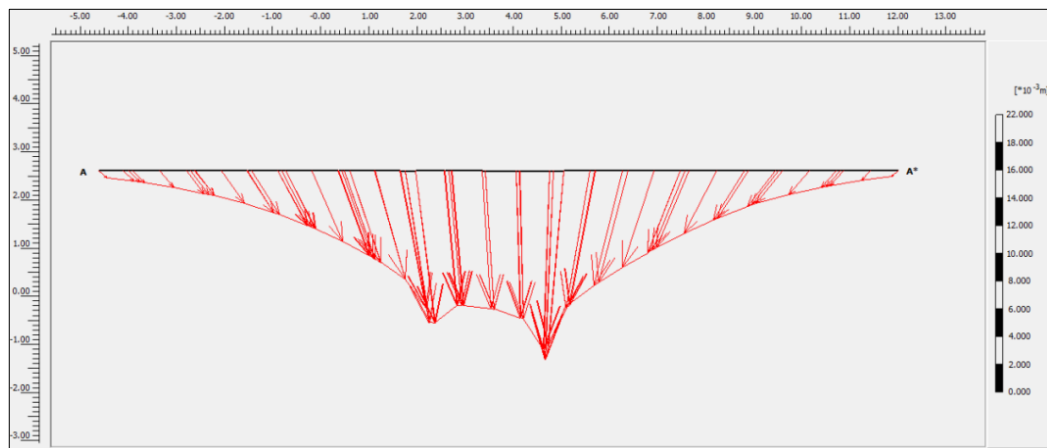


Figura 55: Ingreso Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos en la superficie. Maximo desplazamiento 14.30mm.

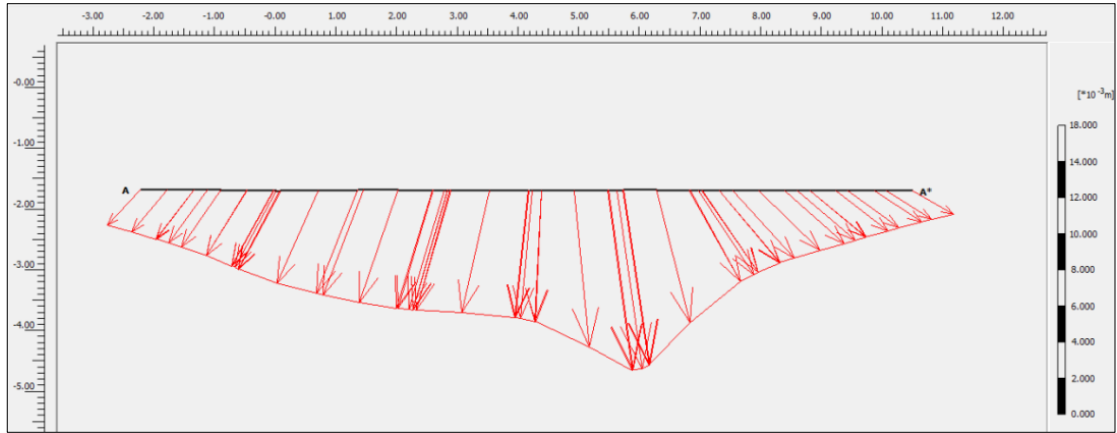


Figura 56: Ingreso Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos a nivel de la Cimentación del muro de contención. Máximo desplazamiento 9.95mm.

b) Salida de túnel.

También analizaremos el comportamiento de los desplazamientos que produce al momento de activar el tunnel liner de 2300mm, en la salida de los túneles.

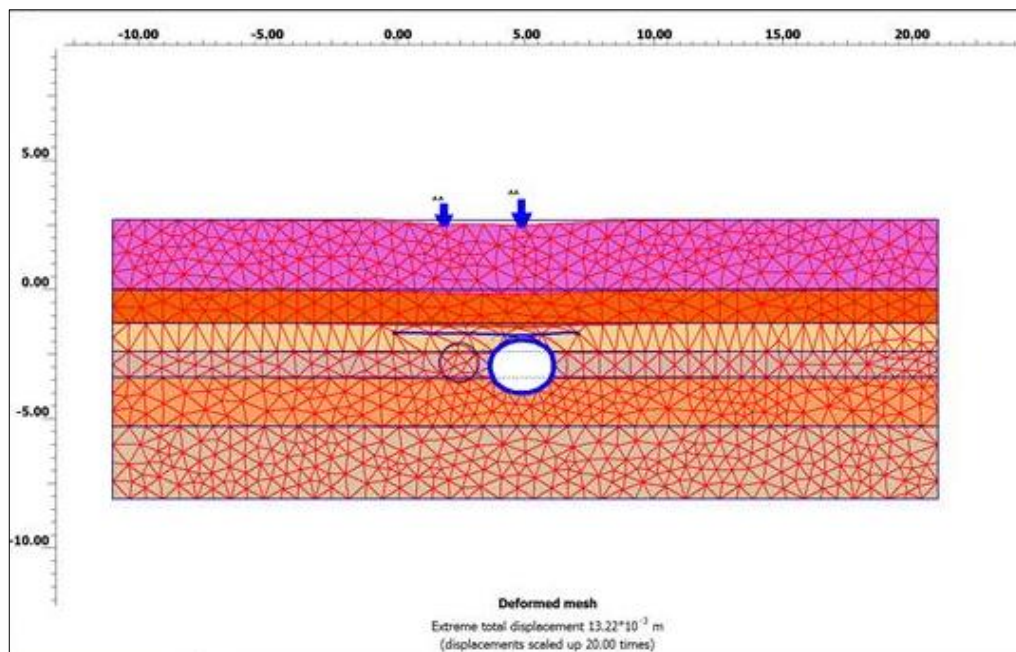


Figura 57: Salida Tunnel liner. Se aprecia la malla deformada a causa del camión C-2

En la figura 58, se aprecia la incidencia del desplazamiento del suelo en profundidad hasta la clave del tunnel liner.

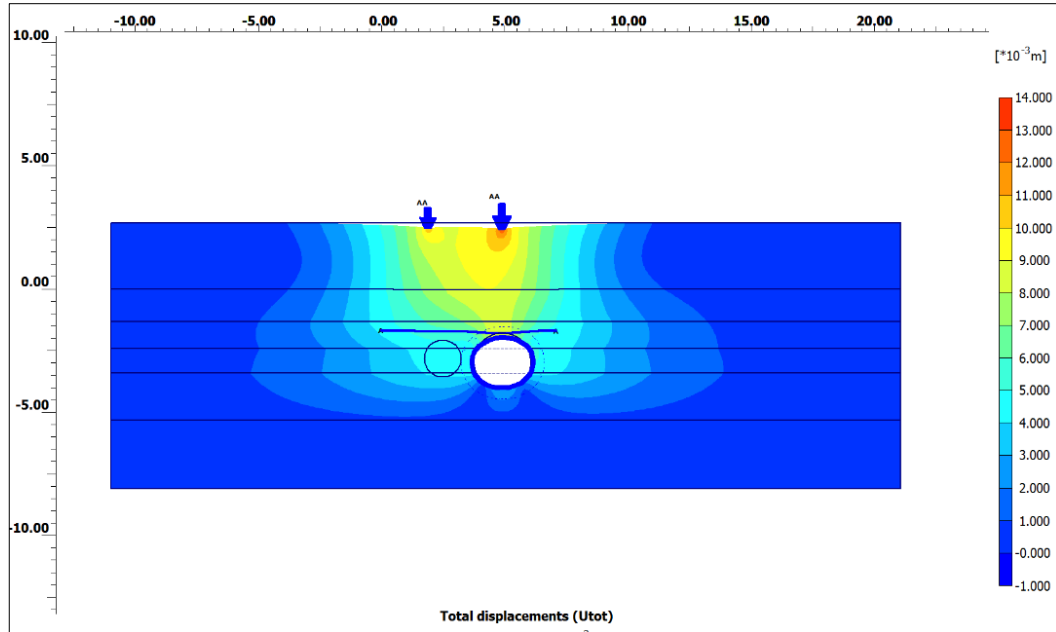


Figura 58: Salida Tunnel liner. Desplazamiento máximo en la superficie 13.22mm.

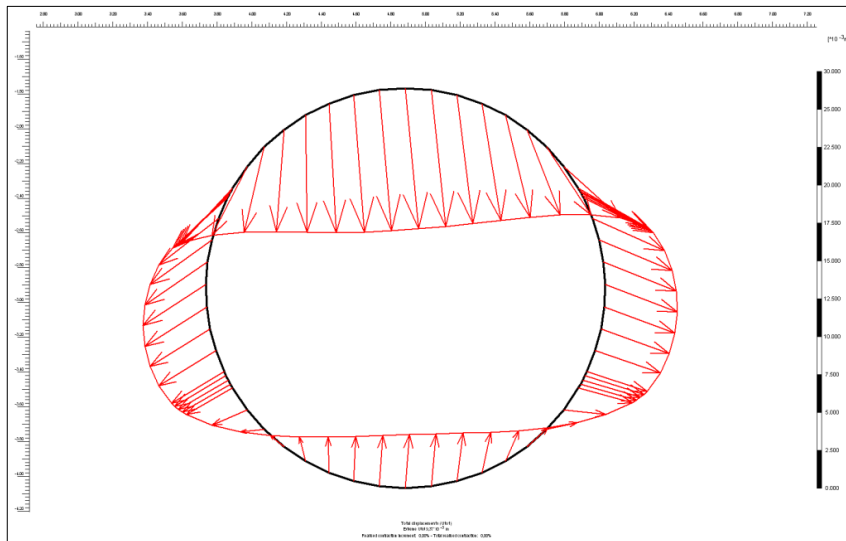


Figura 59: Salida Tunnel liner: Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 2300 mm igual a 9.37 mm

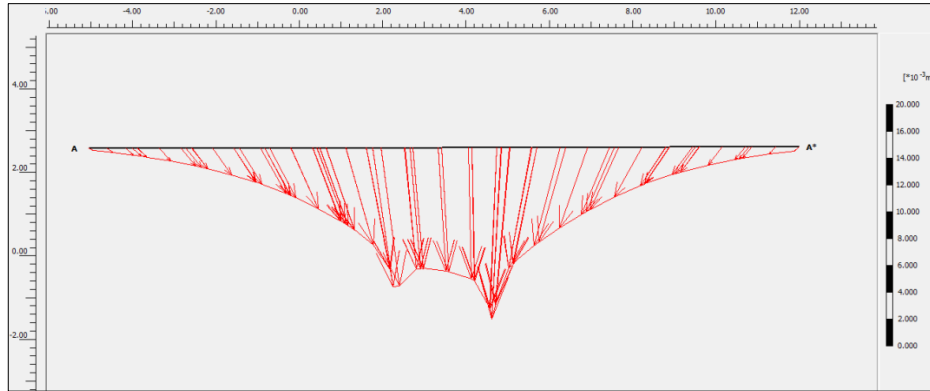


Figura 60: Salida Tunnel liner: Comportamiento de desplazamientos en la superficie Máximo desplazamiento 13.22 mm.

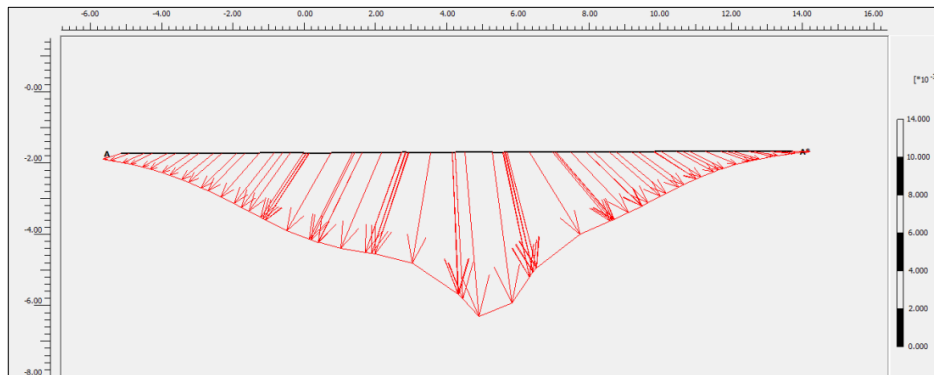


Figura 61: Salida Tunnel liner: Comportamiento de desplazamientos a nivel de la Cimentación del muro de contención. Máximo desplazamiento 8.89 mm.

3.10.4.4.8. Fase III – Ingreso y salida del tune liner: Colocación de Planchas Metálicas Diámetro de Túnel de 1500mm.

En esta fase se considera la excavación del tunnel liner y la colocación de las planchas metálicas de 1500 mm de diámetro. En esta sección se va representar el comportamiento en ambas posiciones (ingreso y salida), para que se encuentren en el marco de la fase considerada.

a) Ingreso tunnel liner.

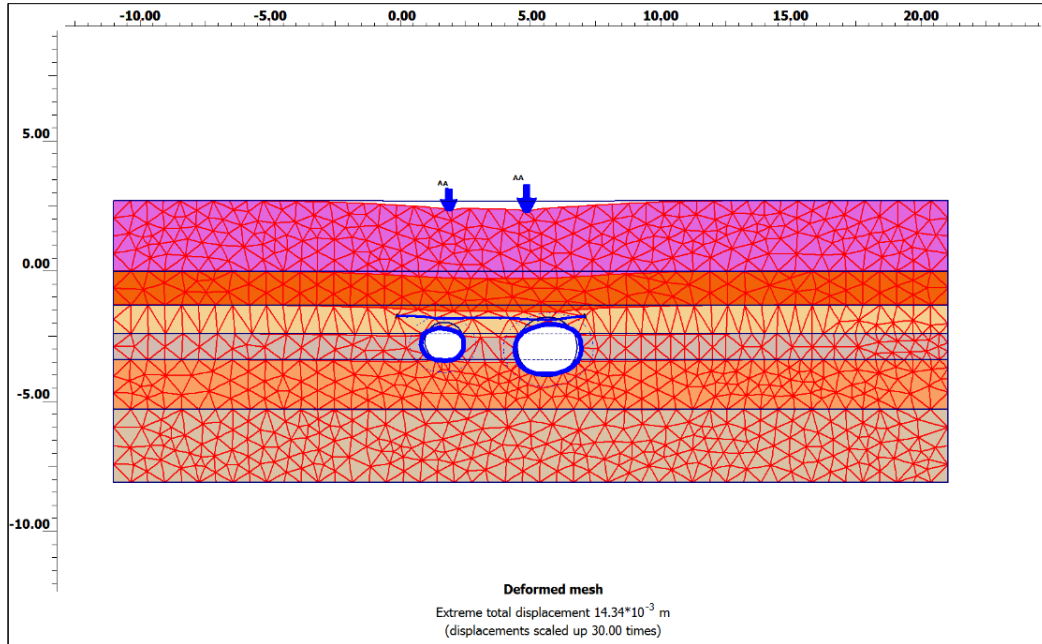


Figura 62: Ingreso Tunnel liner. Se aprecia la malla deformada a causa del camión C-2 la influencia de carga sobre los túneles de 2300 mm y 1500 mm.

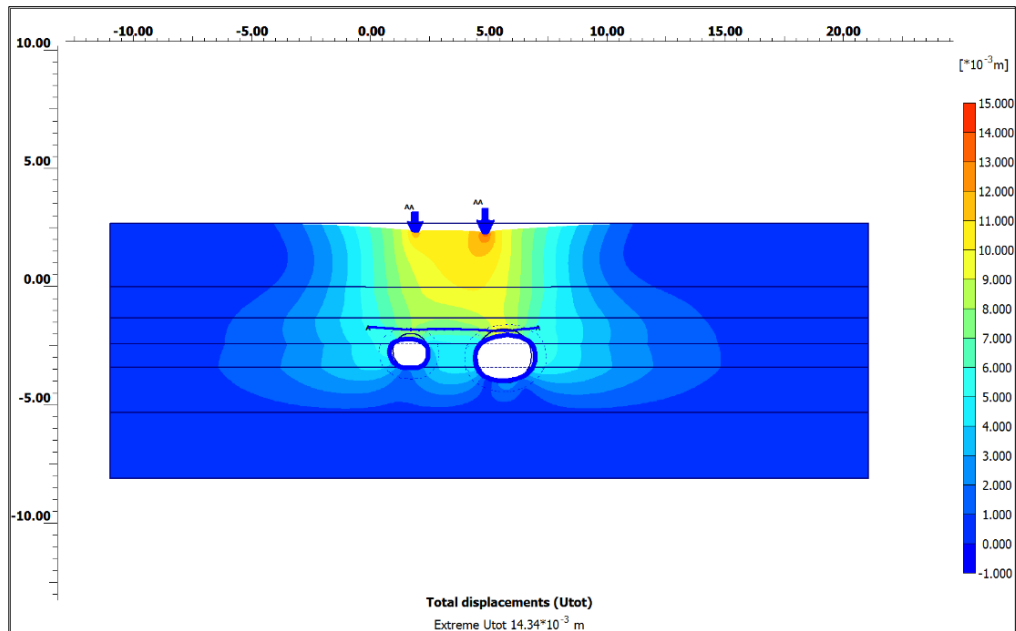


Figura 63: Ingreso Tunnel liner. Se aprecia la incidencia del desplazamiento del suelo en profundidad hasta la clave del tunnel liner. Desplazamiento máximo en la superficie 13.72 mm.

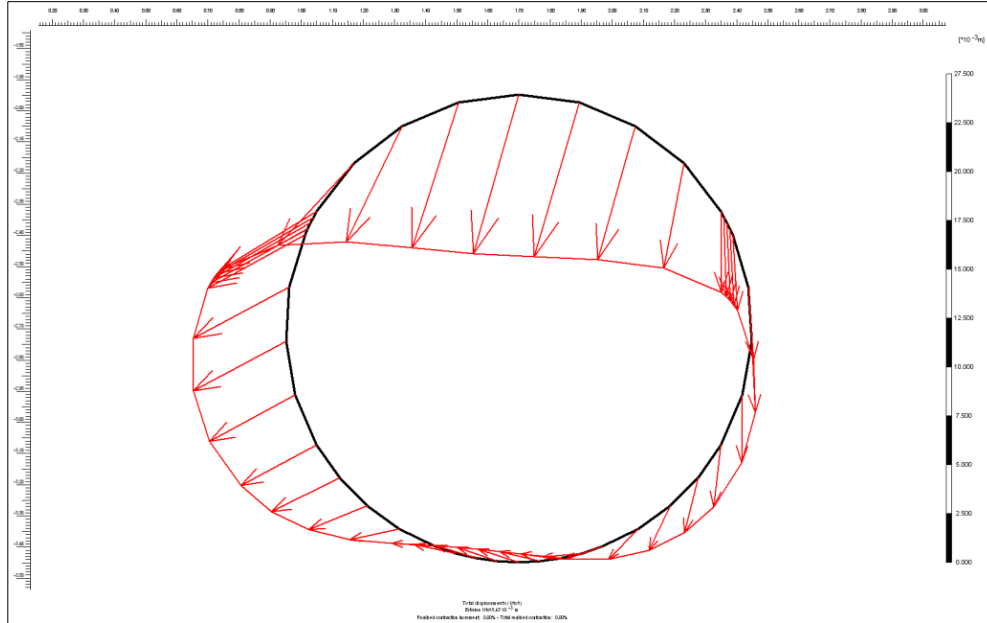


Figura 64: Ingreso Tunnel liner. Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 1500 mm igual a 8.43 mm

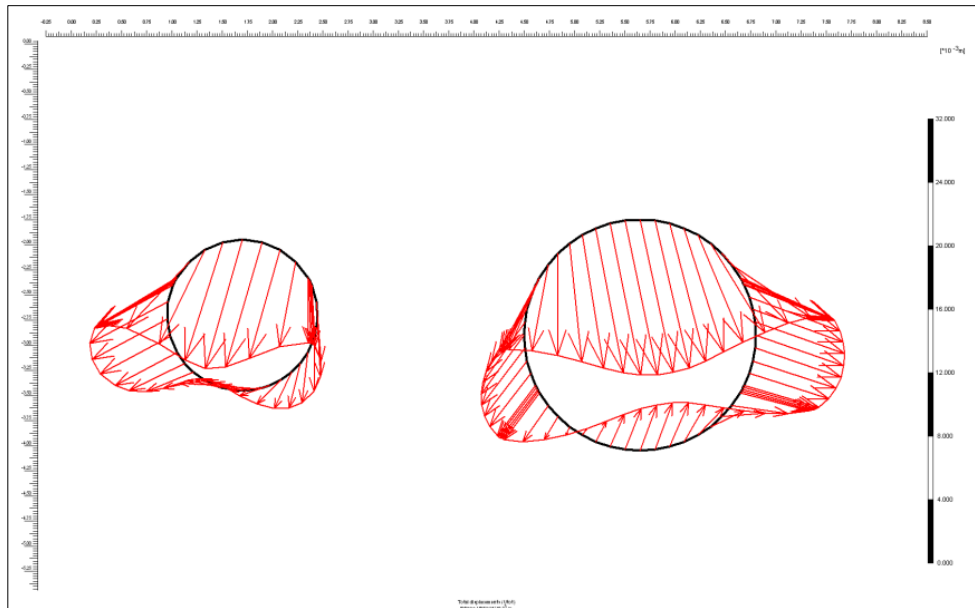


Figura 65: Ingreso Tunnel liner. Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 1500 mm y de 2300 mm

En la figura 65, se muestra el aplastamiento y desplazamiento de las planchas de liner de 1500mm y 2300mm de diámetro en el ingreso de túneles, siendo igual a 8.43mm y 9.94mm respectivamente.

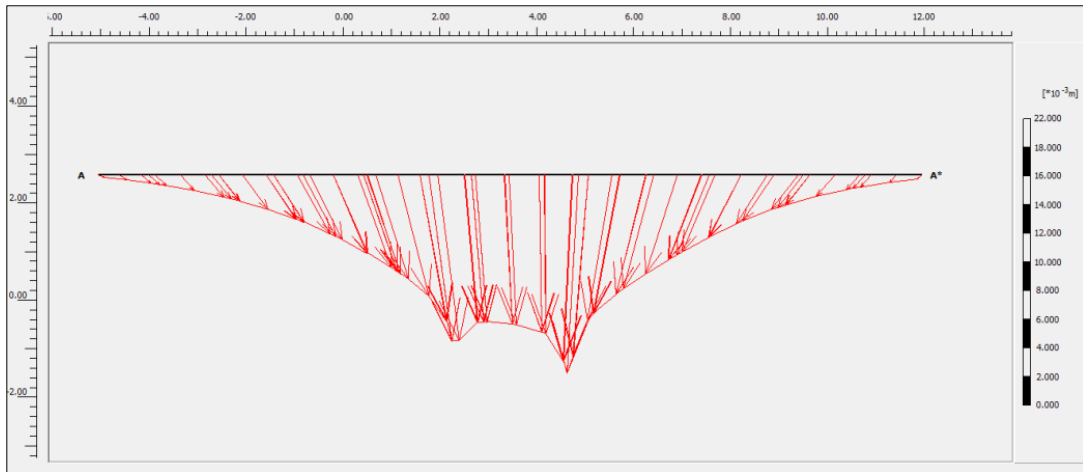


Figura 66: Ingreso Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos en la superficie. Máximo desplazamiento 13.72 mm

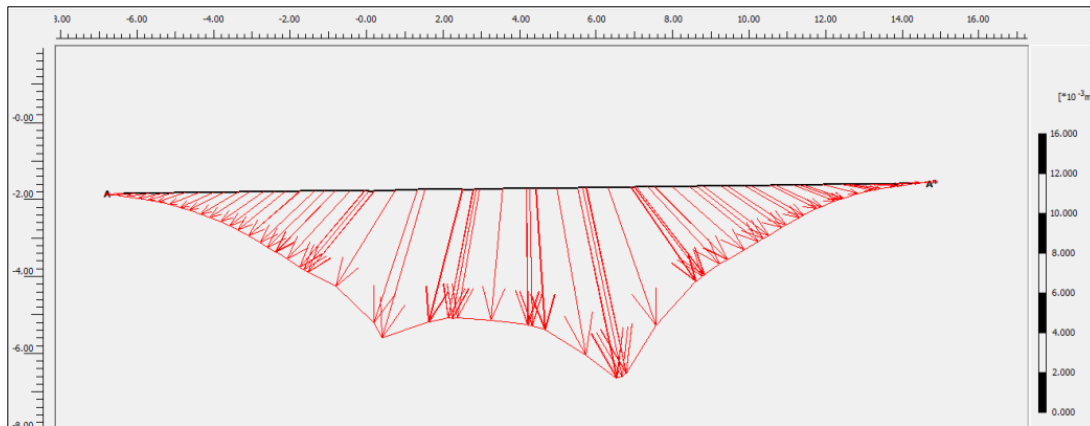


Figura 67: Ingreso Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos a nivel de la Cimentación del muro de contención. Máximo desplazamiento 9.69 mm

b) Salida de tunnel liner

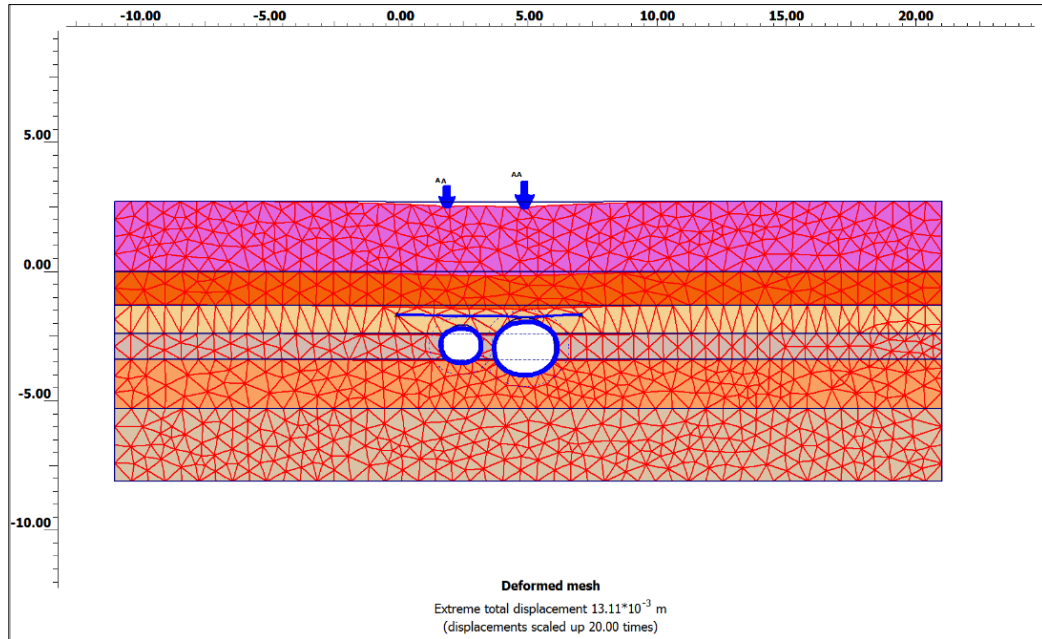


Figura 68: Salida Tunnel liner. Se aprecia la malla deformada a causa del camión C-2 y la influencia de carga sobre los túneles de 2300 mm y 1500 mm

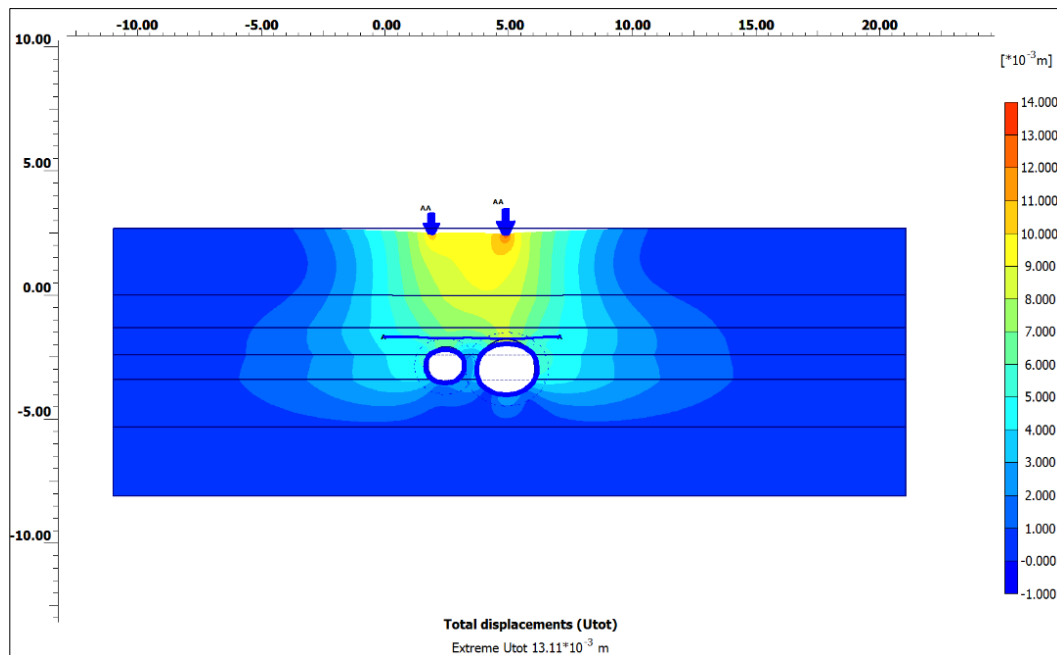


Figura 69: Salida Tunnel liner. Se aprecia la incidencia del desplazamiento del suelo en profundidad hasta la clave del tunnel liner. Desplazamiento máximo en la superficie 13.11 mm

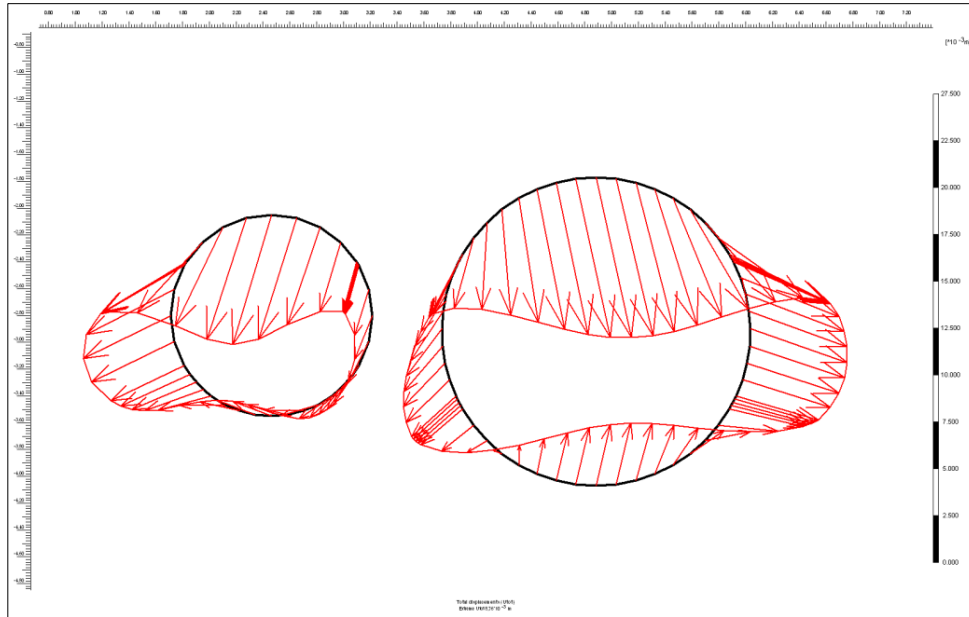


Figura 70: Salida Tunnel liner. Aplastamiento, desplazamiento de la plancha metálica del tunnel liner de 1500 mm y de 2300.

En la figura 70, muestra los aplastamientos y desplazamientos de los túneles de diámetro de 1500mm y 2300mm igual a 7.21 mm y 8.76mm respectivamente. Esto en la salida de los túneles.

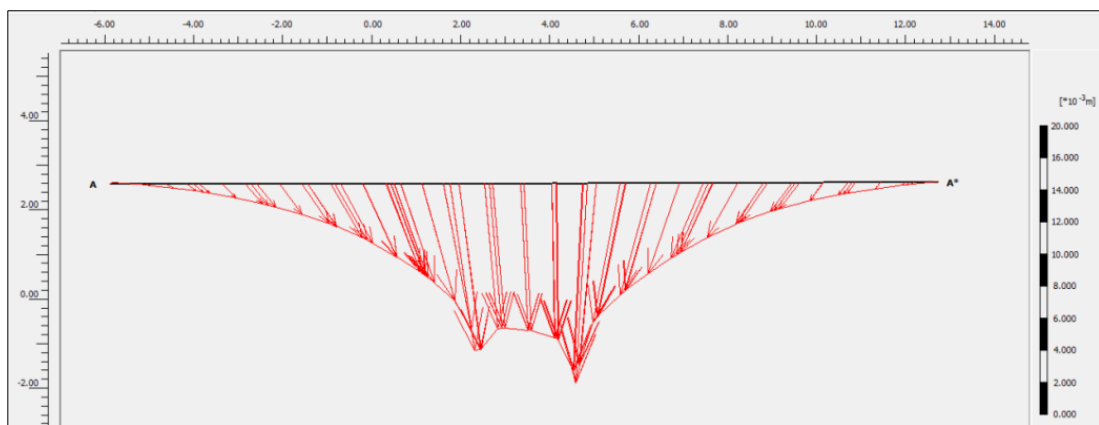


Figura 71: Salida Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos en la superficie. Máximo desplazamiento 13.11 mm

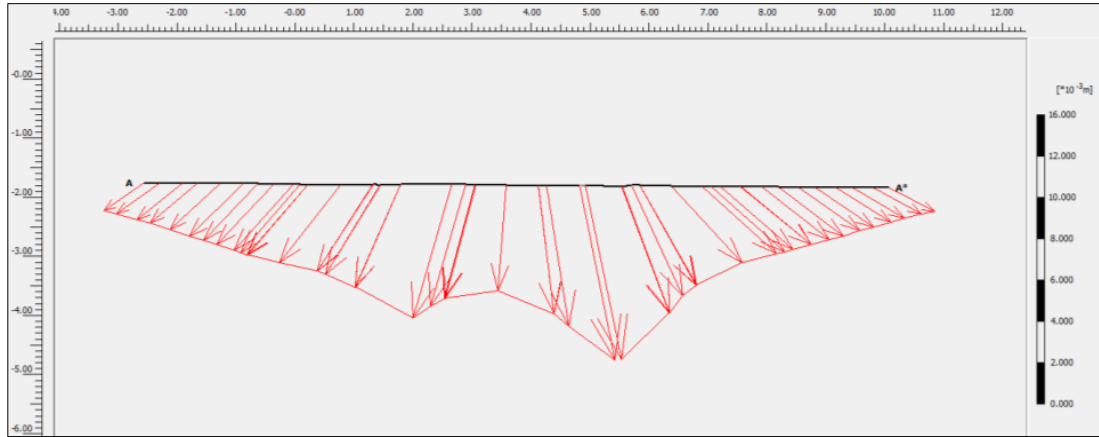


Figura 72: Salida Tunnel liner. Comportamiento de desplazamientos a nivel de la Cimentación del muro de contención. Máximo desplazamiento 8.76 mm

3.10.4.4.9. Factor de seguridad (F.S).

Podemos definir brevemente el factor de seguridad como la relación de la capacidad máxima de soporte y presión de soporte requerida para el equilibrio, Hoek, 1999. Para determinar el factor de seguridad y los desplazamientos admisibles se analizara las fuerzas axiales en las planchas que forman los anillos de revestimiento del túnel, en los diámetros de 1500 mm y 2300 mm en la condición última de carga y de equilibrio. Se multiplicará la carga de servicio del camión C-2 hasta alcanzar la carga última de servicio del modelamiento.

Tabla 23: Determinación del multiplicador de carga para el análisis de la fuerza axial en el anillo de planchas para el tunnel liner

Multiplicador de Carga al Camión C-2	Desplazamiento máximo de plancha para anillo de 2300 mm (mm)	Deformación de plancha para anillo de 2300 mm(%)	Desplazamiento máximo de plancha para anillo de 1500 mm (mm)	Deformación de plancha para anillo de 1500 mm(%)
2.50	20.81	0.90	17.54	1.17
3.00	25.98	1.13	21.39	1.43
3.50	31.22	1.36	25.63	1.71
3.80	34.46	1.50	28.14	1.88
4.00	36.15	1.57	29.74	1.98
4.20	39.76	1.73	31.97	2.13

El cálculo del F.S se puede realizar a través de la siguiente formula.

$$F.S = \frac{\text{Capacidad maxima del soporte}}{\text{Presion de soporte requerida reuquerido por el equilibrio}}$$

A continuación de acuerdo al análisis de los multiplicadores de carga se presenta el diagrama de la fuerza axial en el anillo (método de elementos finitos), para determinar el factor de seguridad correspondiente, a ser usado en el desplazamiento admisible del anillo del revestimiento de cada túnel de 2300 mm y 15000 mm. En las siguientes figuras (las dos primeras) presentamos la fuerza axial última en el anillo y las dos siguientes la fuerza axial en equilibrio, al referirnos al equilibrio, indicamos la carga sin considerar ningún multiplicador de carga.

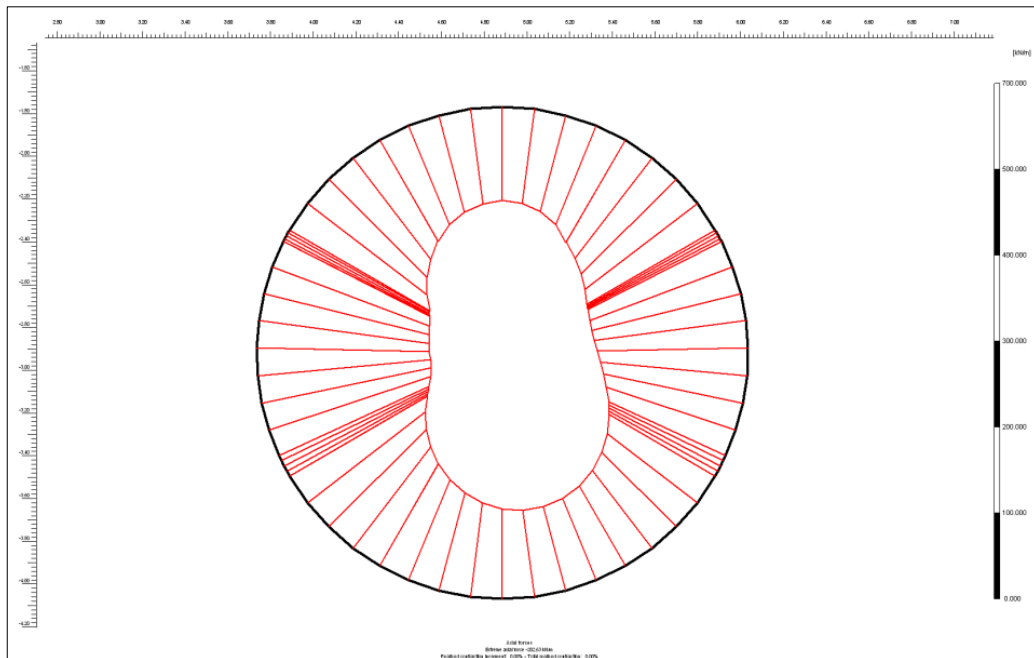


Figura 73: Representación de la fuerza axial en la carga última de 202.63 KN/m para el diámetro de 2300 mm

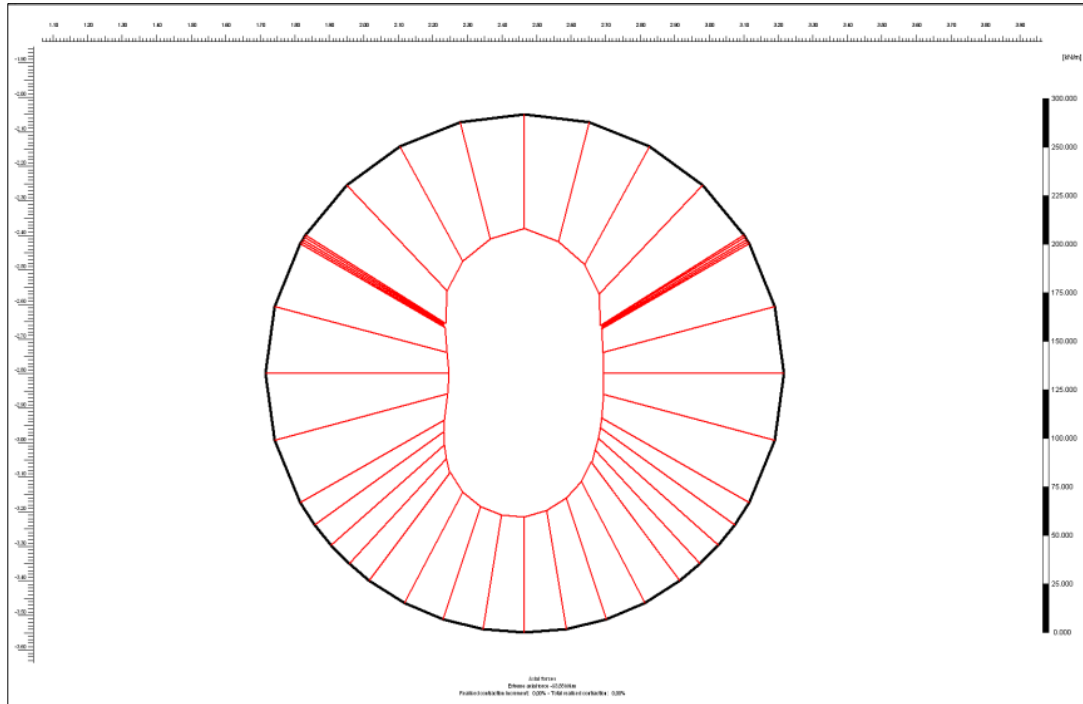


Figura 76: Representación de la fuerza axial en el equilibrio 93.88 KN/m para el diámetro de 1500 mm

En la siguiente tabla se indica un resumen de los factores de seguridad obtenidos y los desplazamientos admisibles.

Tabla 24: Factor de seguridad y desplazamiento máximo

Anillo Plancha Metálica (mm)	Fuerza Axial Última (kN/m)	Fuerza Axial Equilibrio (kN/m)	Factor de Seguridad (F.S)	Desplazamiento Máximo Última (mm)	Desplazamiento Admisible (mm)
2300	202.63	138.09	1.47	39.76	27.10
1500	156.63	93.88	1.67	31.97	19.16

En la siguiente tabla se muestra la deformación que experimentará la plancha liner, al momento de su interacción con el suelo.

Tabla 25: Espesor de plancha y deformación inicial

Espesor de plancha (mm)	Diametro de Túnel (mm)	Desplazamiento máximo de plancha (mm) – Fase III	Deformación de plancha (%)
4.00	1500	8.43	0.562
4.00	2300	9.94	0.43

Mientras que en la siguiente tabla se muestra la deformación máxima a la que pueden ser sometidas las planchas liner, antes de su colapso.

Tabla 26: Espesor de plancha y deformación máxima

Espesor de plancha (mm)	Diametro de Túnel (mm)	Desplazamiento máximo de plancha (mm) – Fase III	Deformación de plancha (%)
4.00	1500	31.97	2.13
4.00	2300	39.76	1.73

Entonces, una vez calculado los factores de seguridad y los desplazamientos máximos. Se puede decir que el espesor óptimo es de 4mm para ambos diametros de túnel. Además es necesario recalcar que en base a la experiencia de los fabricantes de la plancha liner, se recomienda que la deformación de dicha plancha sea menor al 3% de su diametro.

Capítulo IV. Resultados y Discusiones.

4.1. Ensayos de Laboratorio

El resumen de los ensayos estándares de laboratorio se presentan en el cuadro siguiente:

Tabla 27: Resumen de Los Ensayos Estándar de Laboratorio

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Granulometría (%)			Límites (%)		C.H. (%)	Clasificación SUCS
			Grava	Arena	Finos	L.L.	L.P.		
C-1	M-1	0.85 – 1.85	0.31	36.03	63.66	20	17	11	ML
	M-2	1.85 – 2.20	0.00	16.29	83.71	23	19	14	ML
	M-3	2.40 – 3.35	70.78	14.75	14.47	N.P	N.P	1	GM
	M-4	3.35 – 4.00	2.92	92.77	4.31	N.P	N.P	4	SP
	M-5	4.00 - 4.80	4.51	50.21	45.28	N.P	N.P	15	SM
	M-6	4.80 – 5.20	59.21	23.41	17.38	N.P	N.P	7	GM
	M-7	5.20 – 5.50	12.26	81.10	6.64	N.P	N.P	5	SP - SM
	M-8	5.50 – 6.00	75.57	21.71	2.72	N.P	N.P	2	GP
C-2	M-1	0.60 – 1.60	0.00	40.42	59.58	18	16	8	ML
	M-2	1.60 – 2.40	0.00	24.61	75.39	22	21	10	ML
	M-3	2.40 – 3.40	71.69	16.97	11.33	N.P	N.P	2	GP - GM
	M-4	3.40 – 4.70	0.00	70.92	29.08	N.P	N.P	6	SM
	M-5	4.70 – 5.30	0.00	52.02	47.98	N.P	N.P	15	SM

L.L.: Límite líquido

C.H.: Contenido de humedad

L.P.: Límite plástico

Los resultados obtenidos de estos ensayos, nos permiten conocer las propiedades mecánicas de los estratos en donde se emplazarán los túneles. Se puede ver que los tipos de suelos predominantes, al nivel en donde se ubicarán los túneles, son la arena limosa (SM), con arena mal graduada (SP) y grava limosa (GM).

En base a los ensayos realizados, en el siguiente cuadro se presenta el resumen de los parámetros geotécnicos a usar, para el diseño del tunnel liner.

Tabla 28: Parámetros geotécnicos para el diseño del Tunnel liner

Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Estado de Consistencia Compacidad	Grava	Arena	Finos	Limite Liquido, LL	Limite Plástico, LP	Índice Plástico, IP	Densidad (Ton/m3)	Angulo de Fricción, ϕ (°)	Cohesión c (kg/cm2)	Poisson ν	Módulo de Rigidez Young, E (Ton/m2)
0.00 - 0.80	Relleno	Compacidad Media	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0.80 - 1.85	Limo arenoso, ML	Consistencia Rígida	0.15	38.23	61.62	19	17	2	1.53	36.90	0.58	0.30	2502.40
1.85 - 2.40	Limo arenoso, ML	Consistencia Rígida	0.00	20.45	79.55	22	19	3	1.48	36.70	0.27	0.30	1072.69
2.40 - 3.40	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava limosa, GM	Compacidad Media	71.24	15.86	12.90	NP	NP	NP	2.08	38.70	0.16	0.20	1118.02
3.40 - 5.30	Arena limosa, SM, Arena mal graduada, SP, Intercolacion de Grava limosa, GM	Compacidad Media	1.93	66.48	31.79	NP	NP	NP	1.52	34.20	0.18	0.25	1570.22
5.30 - 6.00	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava mal graduada con arena, GP	Compacidad Media a Muy Denso	75.57	21.71	2.72	NP	NP	NP	2.10	38.70	0.16	0.20	3966.04

4.2. Diseño del espesor de tunnel liner mediante la metodología AASHTO

4.2.1. Cargas

Los resultados del cálculo de las cargas evaluadas según la metodología AASHTO, se muestran a continuación.

Tabla 29: Resultado de la determinación de la carga viva.

Altura de relleno sobre la clave de los túneles (h)	Tipo de Carga Vehicular	Carga Viva, P_l (kN/m²)
4.00 - 5.00 m	Camión H20	3.66

Tabla 30: Resultado de la determinación de la carga muerta.

Diámetro mayor de túnel D(m)	Coefficiente de Marston (Cd)	Peso específico del terreno (γ)	Carga Muerta, P_d (kN/m²)
2.30	2.20	20.40	112.20

Finalmente la carga externa que actúa sobre la clave de los túneles, considerando las cargas del relleno y el camión de diseño H20 (según AASHTO), se muestra a continuación.

Tabla 31: Carga externa sobre la clave de los túneles.

Carga Viva, P_l (kN/m²)	Carga Muerta, P_d (kN/m²)	Carga Externa, P (kN/m²)
3.66	112.20	115.86

Al pasar el túnel por debajo de un muro de contención y su cimentación, se analizó la carga que este ejerce sobre la clave de los túneles. Para ello se considera tanto el peso propio del muro, así como la carga máxima que este puede ejercer debido a la ley de distribución trapezoidal de tensiones sobre el terreno generada por el momento flector al que está sometido el muro por el empuje horizontal de tierras. El resultado de estos análisis se muestra a continuación.

Tabla 32: Resultados del análisis de la tensión ejercida del muro sobre la clave de los túneles.

Ancho de base de muro, B (m)	Excentricidad, e (m)	Carga última de muro, Q (kN/m)	Tensión máxima ejercida por el muro, σ (kN/m²)
2.60	0.36	271.70	190.10

Por lo tanto, la carga externa ejercida sobre la clave de los túneles, considerando la carga de camión de diseño y la carga muerta ejercida por el relleno y el peso del muro, se muestra a continuación.

Tabla 33: Carga externa sobre la clave de los túneles.

Carga Muerta, Pd (kN/m²)	Carga Viva, Pl (kN/m²)	Carga Externa, P (kN/m²)
190.10	3.66	193.80

Luego de la determinación de los dos valores de cargas externas sobre la clave de los túneles, se consideró el mayor de los valores para el predimensionamiento y determinación de los espesores de los túneles en estudio.

La determinación de estas cargas se calculó de forma simplificada, afectado principalmente por la influencia estática de la estructura del muro en la interacción de suelo – estructura, no considerando adicionalmente el análisis de la interrelación de los factores de las capas del suelo con los esfuerzos del muro. Se empleó el camión de diseño H20 como recomendación de la metodología AASHTO. El cual presenta la presión que este ejerce a diferentes alturas. Mientras que para el análisis con el Plaxis se usó el camión C2, el cual propone el MTC como el camión de diseño que ejerce mayor presión en su área de contacto.

4.2.2. Criterios de diseño

4.2.2.1. Resistencia de las uniones

De acuerdo a la ecuación para el cálculo del empuje, en el siguiente cuadro se muestran los resultados comprobando el espesor necesario de cada túnel para el cumplimiento respecto a este criterio de diseño.

Tabla 34: Resultado de la resistencia a la conexión empernada.

Túnel D(m)	Espesor (mm)	Empuje T (KN/m)	T*Fs (Fs=3)	Resistencia de la junta longitudinal (kN/m)	Comprobación
2.3	3	222.87	668.61	642.13	NO CUMPLE
2.3	4	222.87	668.61	802.66	CUMPLE
1.5	3	145.35	436.05	642.13	CUMPLE

Siendo la resistencia de las uniones directamente proporcional al espesor de la plancha de la estructura del túnel, se buscó establecer los espesores que cumplan con las condiciones de análisis estando dentro del rango establecido por la resistencia nominal de la costura, que es característico del material. Además, para realizar el cálculo del empuje sobre las uniones entre piezas de planchas, la metodología recomienda considerar el valor de factor de seguridad igual a 3, lo que muestra que la metodología es muy conservadora.

En este caso, para el diseño del espesor de la plancha para el túnel de 2300 mm de diámetro, se consideró un espesor inicial de 3.00mm sin embargo, no cumple con los parámetros mínimos establecidos para la resistencia a la conexión empernada, ya que el empuje generado por las cargas actuantes sobre la estructura, multiplicado por el factor de seguridad, resulta ser mayor que la resistencia característica de la junta longitudinal de la plancha con dicho espesor, entonces, es necesario considerar un espesor mayor, 4.00mm. Para el túnel de 1500 mm de diámetro, se consideró un espesor inicial de 3.00 mm y si cumple con la resistencia a la conexión empernada.

4.2.2.2. Resistencia al Pandeo

La verificación de la resistencia al pandeo se realizó de acuerdo a las fórmulas necesarias y se detallan en el cuadro siguiente:

Tabla 35: Resultado a la resistencia a la compresión

Túnel D(m)	Espesor (mm)	$\frac{r}{k} * 2 \sqrt{\frac{24E}{f_u}}$	f_u (MPa)	f_c (MPa)	$A(cm^2/cm)$	FS	Comprobación
2.3	4	9.29	290	281.11	0.39	4.92	Valido e=4.00mm
1.5	3	9.23	290	286.17	0.39	5.01	Valido e=3.00mm

Considerando las características mecánicas del material y espesor de plancha de la estructura del túnel, se verifico que el factor de seguridad para evitar el pandeo de dichas planchas fue mayor que el límite menor establecido por la metodología, entonces se verifica que los espesores escogidos cumplen con los requerimientos para la resistencia al pandeo.

4.2.2.3. Resistencia en el proceso de manipulación e instalación

Los resultados de esta verificación se detallan en el siguiente cuadro:

Tabla 36: Resultado de resistencia a la manipulación e instalación.

Tunel D(m)	Espesor (mm)	Momento de Inercia (cm^4/cm)	$EI/D^2(kN/m)$	Comprobación
2.3	4	1.25	49.64	No Valido 4.00 mm
2.3	5	1.58	62.75	Valido 5.00 mm
1.5	3	0.91	84.97	Valido 3.00 mm

De acuerdo a las características mecánicas del material de la estructura del túnel, se obtuvo que fue necesario aumentar el espesor de plancha del túnel de 2.30 m de diámetro, respecto a lo determinado en los procesos anteriores, cumpliéndose así la rigidez mínima requerida por la metodología para resistir las cargas normales del proceso constructivo.

4.2.2.4. Deformación o Aplanamiento de la Sección del Túnel

La deformación en un túnel de estas características depende definitivamente de la sobre excavación producida y viene influenciada por el retraso en la inyección en el trasdós del sostenimiento, así como por la calidad o deficiencia en su ejecución.

4.2.2.5. Resumen de dimensionamiento del Tunnel Liner

A partir de los resultados que se obtuvieron, de los criterios de diseño, se estiman recomendables los siguientes espesores de plancha:

Espesor de 5.00 mm para el túnel de 2.30 m de diámetro.

Espesor de 3.00 mm para el túnel de 1.50 m de diámetro.

En el caso de estimarse que las presiones de inyección del trasdós superiores a la carga final de dimensionamiento (193.80 kN/m^2), se deberá repetir el proceso de dimensionamiento para comprobar si los espesores estimados son válidos.

4.3. Diseño del Espesor del Tunnel Liner Mediante el Método de Elementos Finitos Empleando el Software Plaxis 2D.

4.3.1. Calculo Estructural.

4.3.1.1. Resistencia a la compresión

De acuerdo a la evaluación del incremento de esfuerzos del camión C-2 y la sobrecarga del suelo por encima de la clave del túnel liner, se determinó que los esfuerzos en la clave de los túneles en análisis. Por tanto, se considera para el análisis correspondiente el esfuerzo mayor.

Tabla 37: Resultado de la resistencia a compresión, túnel D=2300mm

Descripción		Valor	Unidad
Presión de diseño sobre la clave del tubo	(P)	118,7	KN/m ²
Diámetro o luz de la tubería	(D)	2,3	m
Empuje generado por la carga total compresión axial	(T)	136,51	KN/m
Espesor de plancha de tunnel liner	(e)	4	mm
Área efectiva de sección transversal de la placa de revestimiento	(A)	0,54	cm ² /cm
Radio de giro de la sección	(r)	1,55	cm
Factor de rigidez del suelo	(k)	0,22	
Fuerza de tracción mínima especificada	(f _μ)	290	MPa
Módulo de elasticidad del acero	(E)	205940.65	MPa
Tensión de pandeo sin exceder la fuerza de fluencia	(f _{cr})	280.933	MPa
F.S > 2			

Tabla 38: Resultado de la resistencia a compresión, túnel D=1500mm

Descripción		Valor	Unidad
Presión de diseño sobre la clave del tubo	(P)	118,7	KN/m ²
Diámetro o luz de la tubería	(D)	1.5	m
Empuje generado por la carga total compresión axial	(T)	80.025	KN/m
Espesor de plancha de la tubería	(e)	4	mm
Área efectiva de sección transversal de la placa de revestimiento	(A)	0,54	cm ² /cm
Radio de giro de la sección	(r)	1.55	cm
Factor de rigidez del suelo	(k)	0,22	
Fuerza de tracción mínima especificada	(f _μ)	290	Mpa
Módulo de elasticidad del acero	(E)	205940	MPa
Tensión de pandeo sin exceder la fuerza de fluencia	(f _{cr})	286,144	MPa
F.S > 2			

De acuerdo a los resultados obtenidos, se verifico que la presión ejercida por los esfuerzos generados sobre la clave de los túneles, es menor a la tensión de pandeo que puede soportar la plancha sin exceder la fuerza de fluencia. Por lo tanto, se verifica que los espesores determinados cumplen con la resistencia a compresión

4.3.1.2. Resistencia a la conexión empernada

Estas dependen básicamente del espesor de la plancha a usar.

Tabla 39: Resultado resistencia a la conexión empernada, túnel D=2300mm

Descripción		Valor	Unidad
Empuje generado por la carga total compresión axial	(T)	136,51	KN/m
Resistencia nominal de la costura	(Rj)	802.45	KN/m
Factor de seguridad de la costura	(Fsj)	3	

$$T \leq \frac{R_j}{FS_j} = 267.48$$

Tabla 40: Resultado resistencia a la conexión empernada, túnel D=1500mm

Descripción		Valor	Unidad
Empuje generado por la carga total compresión axial	(T)	89.025	KN/m
Resistencia nominal de la costura	(Rj)	802.45	KN/m
Factor de seguridad de la costura	(Fsj)	3	

$$T \leq \frac{R_j}{FS_j} = 267.48$$

Estos valores nos muestran la capacidad de la plancha de la estructura del túnel a soportar las uniones de piezas para los dos diámetros de túneles analizados. La resistencia nominal, característica de las planchas de túnel de diámetro respectivo, dividido entre el factor de seguridad, es mayor que el empuje generado por las cargas que actúan sobre la estructura, por lo

tanto, queda verificado que las planchas de espesores de 4.00 mm, de ambos túneles, serán suficientes para soportar los efectos de las cargas sobre las uniones entre piezas de estas.

4.3.1.3. Rigidez a la manipulación

Tabla 41: Resultado de la rigidez a la manipulación, túnel D=2300mm

Descripción	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad del acero	(E) 2.9E+07	PSI
Momento de inercia de la placa	(I) 0,079	Pulg4/pulg
Diámetro de la tubería	(D) 90.551	Pulg
Rigidez mínima	287.769	Psi * pulg

Tabla 42: Resultado de la rigidez a la manipulación, túnel D=1500mm

Descripción	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad del acero	(E) 2.9E+07	PSI
Momento de inercia de la placa	(I) 0,079	Pulg4/pulg
Diámetro de la tubería	(D) 59.0551	Pulg
Rigidez mínima	676.578	Psi * pulg

Entonces, de acuerdo a la evaluación de la resistencia a la compresión, resistencia de la conexión empernada, la rigidez a la manipulación y condiciones disponibles para la operación sin interferencias de las infraestructuras urbanas, se ha determinado recomendar los siguientes espesores de plancha y diámetros, para el revestimiento del tunnel liner.

Tabla 43: Resultado de dimensionamiento mínimo de las planchas liner

Diámetro (mm)	Espesor (mm)
1500	4
2300	4

Sin embargo, estos espesores determinados necesitan ser analizados simulando las diferentes fases que fija la metodología de análisis empleando el software Plaxis 2D, para garantizar el adecuado comportamiento de las estructuras en el proceso de instalación y durante su tiempo de servicio ya instalado. Es necesario analizar como es el comportamiento de estas planchas con espesores de 4.00 mm ante las deformaciones que surgen durante la interacción de la estructura con el suelo.

4.3.2. Análisis de Deformaciones por Elementos Finitos.

El análisis mediante el software Plaxis 2D se hizo de acuerdo a las fases fijadas y mencionadas anteriormente, a continuación, se muestran los resultados de los análisis en cada fase:

4.3.2.1. Fase I, Ingreso y Salida del Tunnel Liner, Cargas Vehiculares y Muros de Contención

Del análisis realizado en esta fase, los resultados se muestran en el cuadro siguiente:

Tabla 44: Resultado del análisis de la fase I

Fase 1	Desplazamiento en el Ingreso y Salida del Tunnel Liner (mm)
Carga Vehicular y Muro de Contención	12,64

En esta fase se consideró las cargas vehiculares, la carga del relleno sobre los túneles y la carga ejercida por el muro de contención sobre la estructura de los túneles en estudio, simulando de la forma más cercana al comportamiento real la interacción de estas para luego determinar los desplazamientos generados por dicha interacción.

4.3.2.2. Fase II, Ingreso y Salida del Tunnel liner, Colocación de Planchas Metálicas

Diámetro de túnel 2300 mm

Considerando la excavación del túnel y la colocación de las planchas metálicas del diámetro referido, en el cuadro siguiente se muestran los resultados del comportamiento del túnel en ambas posiciones (ingreso y salida)

Tabla 45: Resultado del análisis de la fase II

Fase 2: Colocación de Planchas Metálicas Diámetro de Túnel 2300 mm	Máximo Desplazamiento Superficie (mm)	Máximo Desplazamiento en la Cimentación del Muro de Contención (mm)	Máximo Desplazamiento Aplastamiento del Tunnel liner de 2300 mm de Diámetro (mm)
Ingreso Tunnel Liner	14,3	9,95	10,24
Salida Tunnel Liner	13,22	8,89	9,37

4.3.2.3. Fase 3, Ingreso y Salida del Tunnel Liner, Colocación de Planchas Metálicas

Diámetro de túnel 1500 mm

Considerando la excavación del túnel y la colocación de las planchas metálicas del diámetro referido, en el cuadro siguiente se muestran los resultados del comportamiento del túnel en ambas posiciones (ingreso y salida).

Tabla 46: Resultado del análisis de la fase III

Fase 3: Colocación de Planchas Metálicas Diámetro de Túnel 1500 mm	Máximo Desplazamiento Superficie (mm)	Máximo en la Cimentación del Muro de Contención (mm)	Máximo Desplazamiento Aplastamiento del Túnel de 1500 mm de Diámetro (mm)	Máximo Desplazamiento Aplastamiento del Túnel de 2300 mm de Diámetro (mm)
Ingreso Tunnel Liner	13,72	9,69	8,43	9,94
Salida Tunnel Liner	13,11	8,76	7,21	8,76

Todos estos desplazamientos hallados corresponden a las presiones de equilibrio, es decir en las condiciones de modelamiento de carga camión C-2 y parámetros geotécnicos evaluados. Sin embargo, la resiliencia de las planchas que conforman en anillo de revestimiento de tunnel liner puede presentar mayor desplazamiento o deformación, para ello se factoro la carga del camión C-2 hasta lograr la carga ultima antes de la falla.

4.3.2.4. *Factor de seguridad*

Se analizó las fuerzas axiales en las planchas que forman los anillos de revestimiento de túnel, en los dos túneles en la condición última de carga y de equilibrio. Se multiplico la carga de servicio del camión C-2 hasta alcanzar la carga última de servicio de modelamiento.

A continuación se muestra los análisis para determinar el factor multiplicador de carga para el análisis de la fuerza axial en el anillo de las planchas de tunnel liner.

Tabla 47: Resultado de la factoración de carga del camión de diseño C-2

Multiplicador de Carga al Camión C-2	Desplazamiento máximo de plancha para anillo de 2300 mm (mm)	Deformación de plancha para anillo de 2300 mm(%)	Desplazamiento máximo de plancha para anillo de 1500 mm (mm)	Deformación de plancha para anillo de 1500 mm(%)
2.50	20.81	0.90	17.54	1.17
3.00	25.98	1.13	21.39	1.43
3.50	31.22	1.36	25.63	1.71
3.80	34.46	1.50	28.14	1.88
4.00	36.15	1.57	29.74	1.98
4.20	39.76	1.73	31.97	2.13

También se presenta el cuadro de resumen de los factores de seguridad obtenidos y los desplazamientos admisibles para la construcción de los túneles:

Tabla 48: Resultado de F.S y desplazamientos máximos admisibles.

Anillo Plancha Metálica (mm)	Espesor de plancha (mm)	Fuerza Axial Ultima (kN/m)	Fuerza Axial Equilibrio (kN/m)	Factor de Seguridad (F.S)	Desplazamiento Máximo Ultima (mm)	Desplazamiento Admisible (mm)
2300	4.00	202.63	138.09	1.47	39.76	27.10
1500	4.00	156.63	93.88	1.67	31.97	19.16

Los resultados que se muestran en la tabla 48 son los correspondientes a un espesor de plancha de 4mm para ambos túneles. Estos resultados muestran el desplazamiento máximo al cual pueden ser sometidas las planchas antes de dar inicio a su falla.

Luego de obtener los resultados por ambas metodologías, se observa que la metodología AASHTO se limita en el análisis de los asentamientos de las estructuras existentes. También se limita en realizar la comprobación de tres parámetros para determinar el espesor de los revestimientos, y durante estos procesos hay valores que se asumen, como es el caso del factor de seguridad para la verificación de la resistencia a la conexión empernada.

Por otro lado, la metodología de análisis y diseño empleando el modelamiento numérico con el software Plaxis, además de realizar el predimensionamiento verificando la resistencia de las uniones, a la compresión y a la manipulación de las planchas de la estructura de los túneles, se realiza simulaciones en fases de construcción, donde se analiza el comportamiento de las estructuras existentes, logrando así controlar los asentamientos que estas pueden experimentar.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones:

Se concluye que, luego de hacer un cálculo estructural para determinar el espesor de los revestimientos de los túneles y verificar sus comportamientos ante las deformaciones generadas por las fuerzas de interacción suelo estructura, mediante el análisis con el modelamiento numérico con Plaxis 2D, es necesario considerar un espesor de 4.00 mm para ambos diámetros de túneles. En el caso del túnel de diámetro de 1500 mm, el máximo desplazamiento por aplastamiento del revestimiento es de 8.43 mm, esto significa el 0.56% del diámetro del túnel. En el caso del túnel de diámetro de 2300 mm, el máximo desplazamiento por aplastamiento del revestimiento es de 10.24 mm, esto significa el 0.45% del diámetro del túnel. Siendo la deformación máxima permisible para los túneles de diámetro de 1500 mm y 2300 mm el 2.13% y 1.73% respectivamente, los espesores diseñados presentan deformaciones dentro de lo permisible, sin llegar al estado límite de servicio.

Se concluye que realizar el análisis de interacción suelo - estructura por la metodología AASHTO, es muy general ya que al suelo que esta sobre la estructura de los túneles se considera con propiedades desconocidas, asumiendo el peor de los casos, además se considera un factor de seguridad recomendado ($FS=3$) generando una estimación de espesor de revestimiento tan conservador, elevando los costos del proyecto.

Se concluye que luego de realizar los análisis de los esfuerzos generados por la carga viva, cargas permanentes, y la interacción del suelo con la estructura de los túneles, permitió la adecuada elección del espesor del revestimiento, cumpliendo con el diseño estructural y controlar las deformaciones generadas por la interacción mencionada.

Empleando la metodología ASSHTO, los espesores de revestimiento requeridos, para los túneles de diámetro de 1500 mm y 2300 mm, son de 3.00 mm y 5.00 mm respectivamente. El diseño de estos espesores de recubrimiento, se hizo considerando que sobre la clave del túnel el suelo es homogéneo y de propiedades desconocidas, tomándose valores que hacen un diseño muy conservador.

Por otra parte, mediante el diseño estructural y análisis de deformaciones generadas por las diferentes cargas de diseño, los espesores de recubrimiento requeridos para los túneles de diámetro de 1500 mm y 2300 mm son de 4.00 mm. En esta metodología (Elementos Finitos) se consideró las diferentes características de los estratos del perfil geotécnico, se analizó los desplazamientos en diferentes puntos, en la clave de los túneles, en la superficie del terreno, en la base de cimentación de los muros de contención que están sobre el túnel y se verificó que los espesores de recubrimiento diseñados, sin llegar a su estado límite de servicio, controlan los desplazamientos admisibles que puede soportar las estructuras de los túneles.

Entonces se concluye que, empleando la metodología de Elementos Finitos, se obtienen los espesores de recubrimientos óptimos, los cuales garantizan un comportamiento ideal en la interacción suelo – estructura. Donde los efectos que generen fallas hacia la estructura del túnel y sobre la superficie del terreno serán mínimos o nulos. Esto se garantiza debido a que se diseñó considerando las características geotecnicas reales que se obtuvieron del perfil geotécnico y se hizo el análisis de desplazamientos en diferentes partes de esta interacción.

Recomendaciones:

Se recomienda emplear la metodología de diseño del revestimiento del tunnel liner empleando el Método de Elementos Finitos, ya que dicho método permite modelar la interacción suelo - estructura lo más cercano a la realidad y con ello conocer los desplazamientos en diferentes puntos garantizando un buen comportamiento de la estructura a fin de evitar las diferentes fallas que se puedan generar.

Para futuras investigaciones, se recomienda analizar los desplazamientos empleando softwares adicionales, además del Plaxis 2D, para poder tener una mayor precisión y control de los desplazamientos que se generen en la interacción suelo estructura.

Respecto al factor de seguridad empleado para la determinación de la capacidad a los desplazamientos de los anillos del tunnel liner, se recomienda realizar el análisis correspondiente, factorando la carga del camión de diseño C-2 hasta lograr la carga ultima antes de la falla, mas no asumir un valor estimado.

Se recomienda realizar los estudios geotécnicos descritos en la presente investigación. Ya que el software Plaxis usa una variedad de parámetros geotécnicos los cuales ayudaran en la precisión de los cálculos.

Si bien es cierto el método de los elementos finitos data de los años ´80, en el mundo de la geotecnia en Perú, aún sigue siendo pobre. Es así que se recomienda indagar a mayor extensión sobre este tema, ya que nos brinda mayor precisión sobre el comportamiento de la interacción suelo - estructura.

Referencias

- AASHTO. (2012). AASHTO LRFD Bridge. Washington, DC.
- Alva Hurtado, J. (2013). Aplicaciones de la Geofísica en la Ingeniería Geotécnica. Lima.
Recuperado de <http://www.jorgealvahurtado.com/files/CONEIC2013.pdf>
- American Society For Testing and Materials. (1998a). ASTM D-2216. Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y rocas por masa. ASTM International: West Conshohocken.
- American Society For Testing and Materials. (1998b). Suelo, ASTM D-422. Método de Análisis del Tamaño de las Partículas de Suelo. ASTM International: West Conshohocken.
Recuperado de www.astm.org
- American Society For Testing and Materials. (2005). Norma ASTM D4318-05 Métodos de prueba estándar para Límite Líquido, Límite Plástico y Índice de Suelos de Plasticidad. ASTM International: West Conshohocken. Recuperado de www.astm.org
- American Society For Testing and Materials. (2016). ASTM D-4253 y ASTM D-4254 Métodos de prueba estándar para la Densidad Máxima y Mínima. ASTM International: West Conshohocken.
- Braja M, D. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (cuarta). México: Cengage Learning Editores S.A.
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID). (1992). Seminario Taller de Mecánica de Suelos y Exploración Geotécnica. Lima.
- Civil Engineering Department of the University of Illinois. (s. f.). *Design of Tunnel Support*

Systems. EE.UU.

Cuenca Alfaro, B. R. (2009). *Túneles en Suelos con Énfasis en Carreteras*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cuevas Pérez, J. (2012). *Interacción Suelo-Estructura utilizando el Método de Elementos Finitos (tesis de maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México.

De La Rosa Arenas, D. (2015). *Comportamiento de Túneles Excavados Mediante el Método Convencional (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Díaz González, H., & Ángel Reyes, G. (s. f.). Análisis comparativo de la Teoría de Martson para tuberías Enterradas y la Modelación Numérica con Elementos Finitos. *Universidad Nacional de Colombia*, 1-13.

Flores López, F. A. (2010). *Análisis del Comportamiento Estático de Túneles Excavados en Suelos Blandos (tesis de maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F, México.

Galvan Adames, M. E. (2014). *Análisis de la Transmisión de Vibraciones Originales en Tuneles Utilizando el Programa PLaxis*. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Gálvez Cruz, D. (2011). *Cálculo Estructural de Tuberías Enterradas por el Método de Elementos Finitos, con Base en el Informe Técnico CEN/TR 1295-3 (tesis doctoral)*. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Gonzáles Acosta, J. L. (2013). *Determinación de Asentamientos Considerando la Variación Horizontal de los Parámetros Mecánicos del Suelo (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. México.

- Gonzalez De Vallejo, L., Ortuño Abad, L., Ferrer Gijon, M., & Oteo Mazo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid.
- Guerrero Issotta, C. E. (2013). *Túneles Bajo Nivel del Mar para Solución Anti-Tsunami en Sistema de Agua de Enfriamiento en Centrales Termoeléctricas a Carbón (tesis de pregrado)*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Kunst, D. J. (2017). *Modelling Construction Phases of Bored Tunnels With Respect to Internal Lining Forces (tesis de maestría)*. Universidad Tecnológica de Delft.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2012). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa S.A.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras Túneles, Muros y Obras de Arte*. Lima.
- Möller, S. C. (2006). *Tunnel Induced Settlements and Structural Forces in Linings (tesis doctorado)*. Universidad de Stuttgart, Alemania. Recuperado de http://www.uni-s.de/igs/content/publications/Docotral_Thesis_Sven_Moeller.pdf
- MTC. (2003). *Reglamento Nacional de Vehículos*. Lima.
- Plaxis Models Manual. (2018). *Plaxis 2D Material Models Manual 2018*.
- Rodríguez Rodríguez, K. J. (2014). *Subsidencia por la Construcción de Túneles en Suelos Blandos Saturados (tesis de maestría)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Senthilnath, G. T., & Velu, D. (2016). Stacked Tunnelling Induced Surface Settlements in Soft Soil. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, 3(3), 162-175.
- Serkan, Ü. (2006). *Comparison of 2D and 3D Finite Element Models of Tunnel Advance in Soft Ground: A Case Study on Bolu Tunnels (tesis de maestría)*. Middle East Technical University.

Shabna, P. S., & Sankar, N. (2016). Numerical Analysis of Shallow Tunnels in Soft Ground Using Plaxis2D, 7(4), 161-166.

US Army Corps of Engineers. (1995). Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations. Washington DC, EE.UU.

Anexos

Anexo A Panel Fotográfico.



Figura 77: Zona de estudio



Figura 78: Inicio de exploración de campo



Figura 79: Toma de muestras



Figura 80: Ensayo de densidad de campo



Figura 81: Excavación de calicatas



Figura 82: Entibado de calicatas



Figura 83: Horno para secado de muestras



Figura 84: Instrumento para el ensayo de Limite Líquido



Figura 85: Ensayo de corte directo



Figura 86: Ensayo de corte directo



Figura 87: Secado de muestras - Ensayo de corte directo



Figura 88: Tesistas durante el inicio de ejecución de obra.

Anexo B: Ensayo de Densidad de Campo

Se realizaron ensayos de densidad de campo a los perfiles de suelo identificados, con el fin de determinar los estados de compacidad y consistencia.

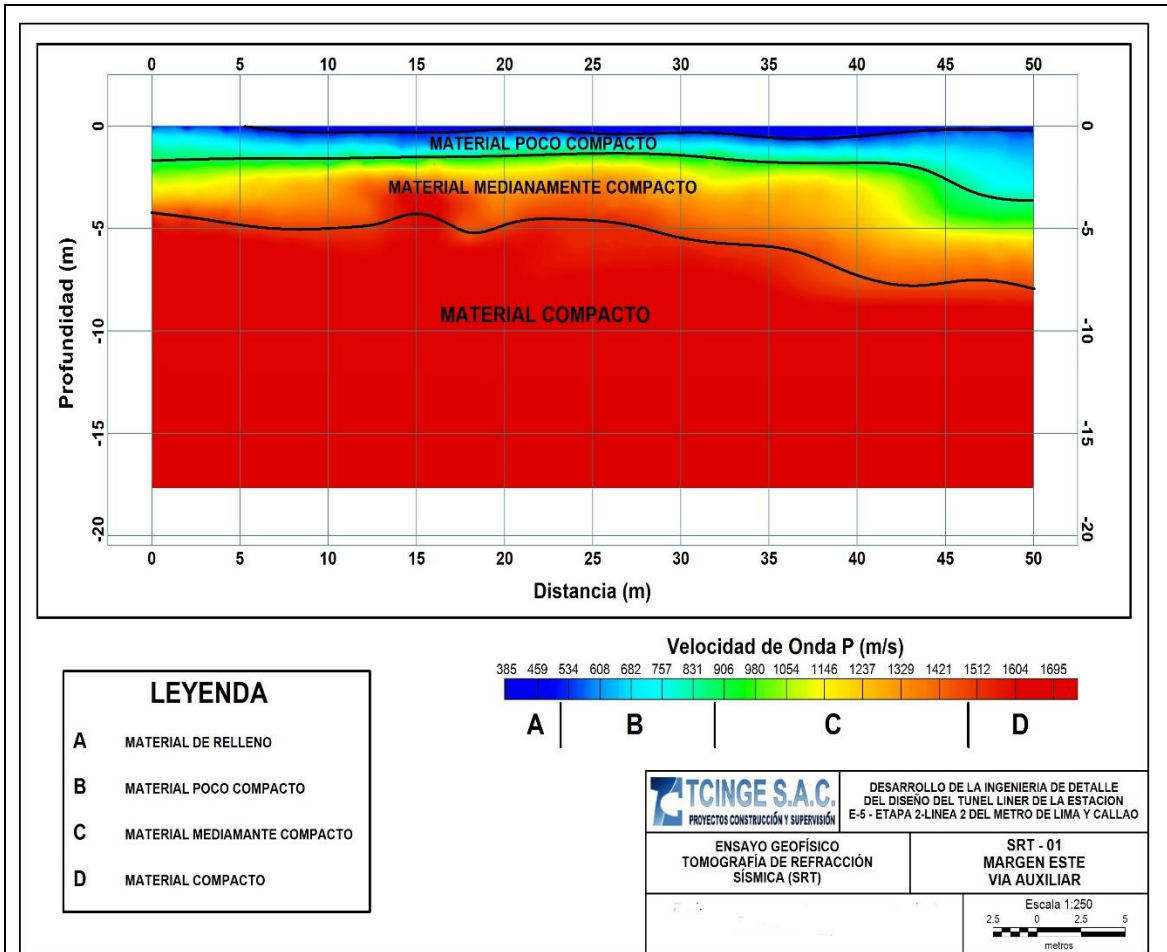
A continuación de muestra los resultados de dichos ensayos:

Calicata	Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Contenido de Humedad (%)	Densidad Húmeda (gr/cc)	Densidad Seca (gr/cc)
C-1	1.06	Limo arenoso ML	11	1.51	1.36
	1.85	Limo arenoso ML	14	1.49	1.33
	4.20	Arena limosa SM	15	1.56	1.36
C-2	0.90	Limo arenoso ML	8	1.54	1.43
	2.00	Limo arenoso ML	10	1.46	1.33
	3.40	Arena limosa SM	6	1.47	1.39
	4.70	Arena limosa SM	6	1.83	1.73

Anexo C: Ensayo de Refracción Sísmica.

De acuerdo a los datos obtenidos de campo para cada una de las líneas sísmicas, se obtuvieron los siguientes perfiles sísmicos:

Tabla 49: Resultado LS 01



Ensayo	Onda	Descripción
LS 01	P	<p>De 0.00 a 0.50 m. (en promedio) se tiene un material de relleno con velocidad V_p que varía de 385 a 460 m/s.</p> <p>De 0.50 a 2.00 m. (en promedio) se tiene material poco compacto con velocidad V_p que oscila varía de 530 a 830 m/s.</p> <p>De 2.00 a 5.00 m. (en promedio) se tiene material medianamente compacto con velocidad V_p que varía de 900 - 1420 m/s.</p> <p>>5.00 m. se tiene un material compacto con velocidad V_p mayor a 1500 m/s. a más.</p>

Tabla 50: Resultado LS 02

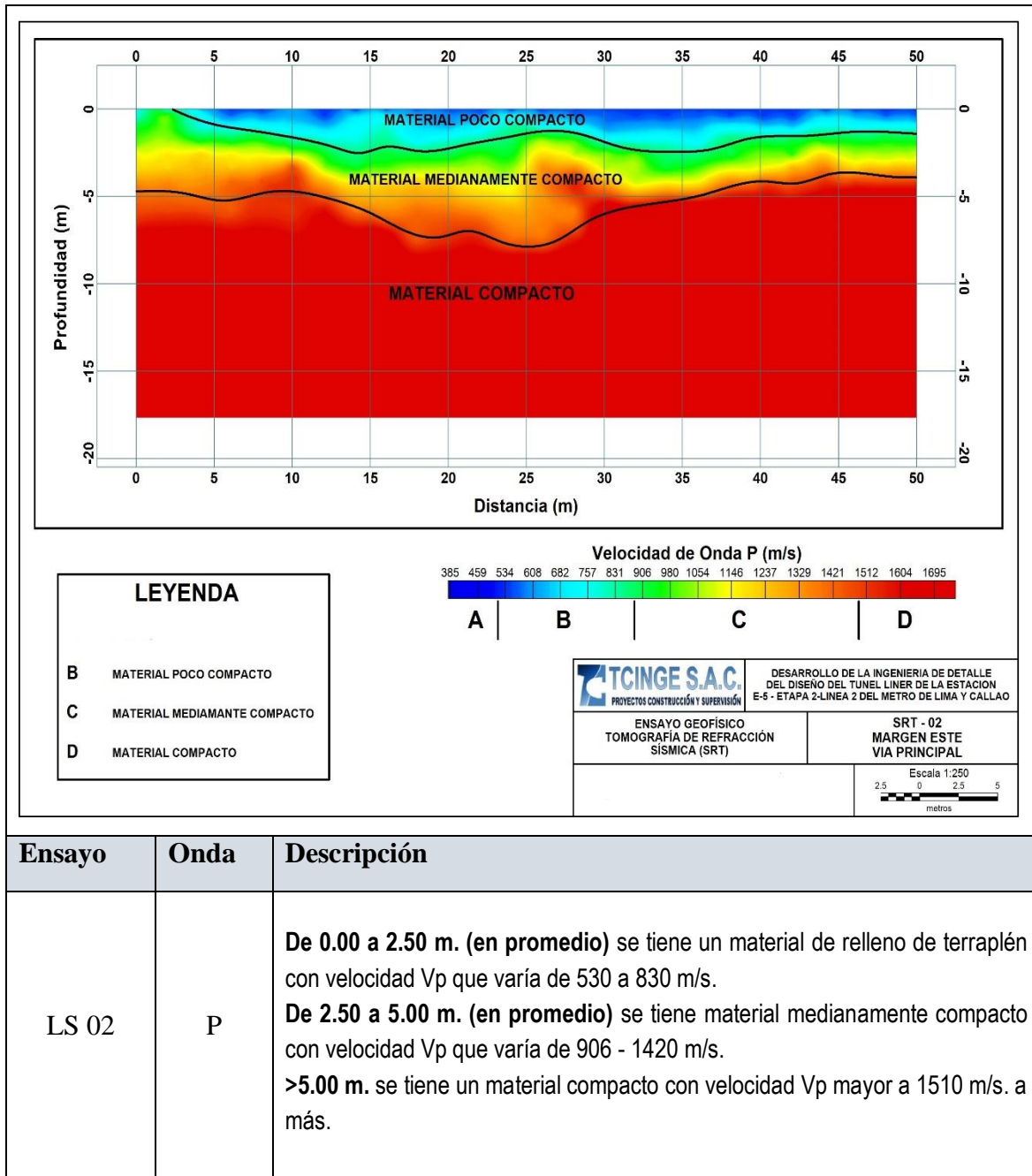


Tabla 51: Resultado LS 03

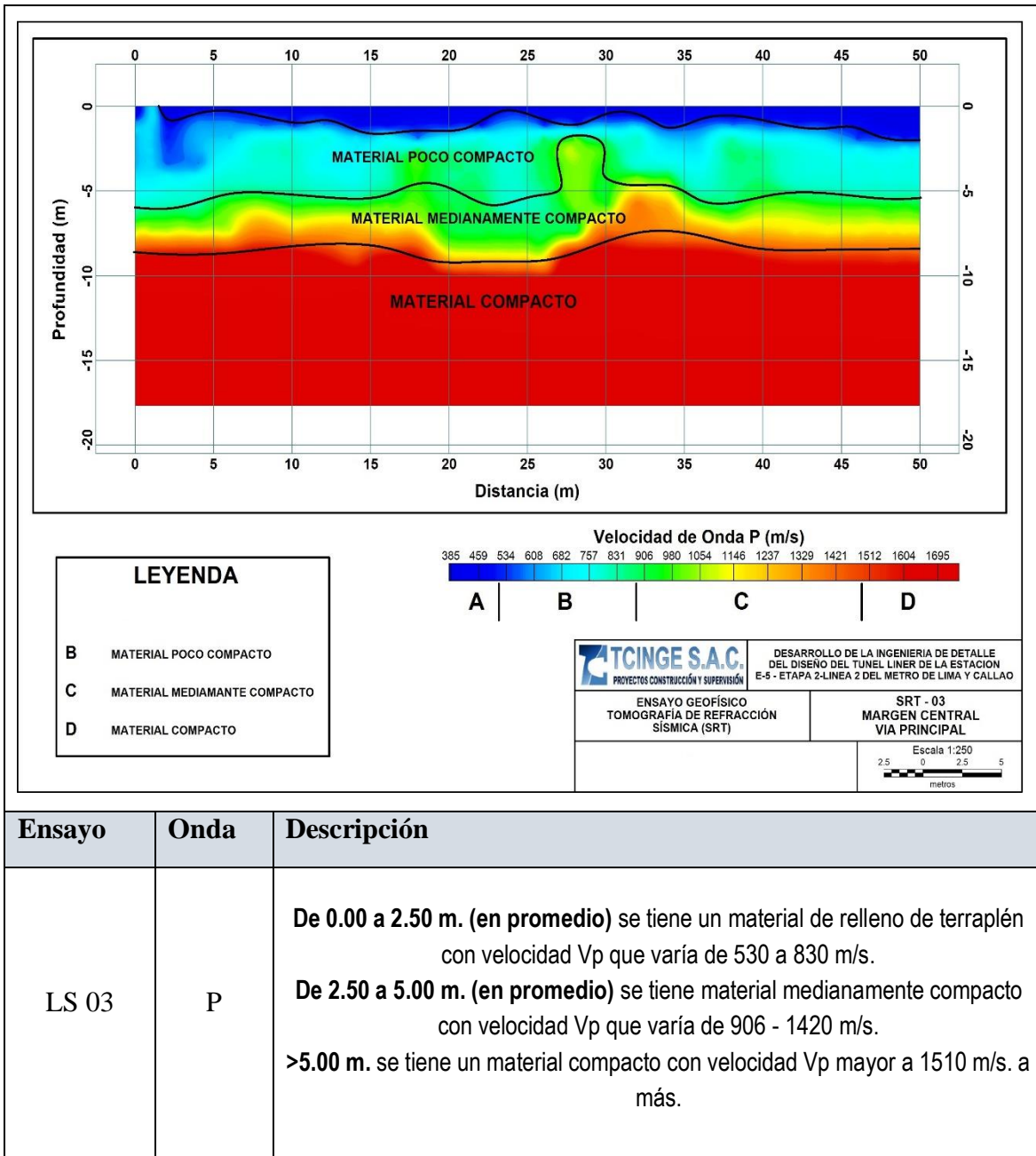


Tabla 52: Resultado LS 04

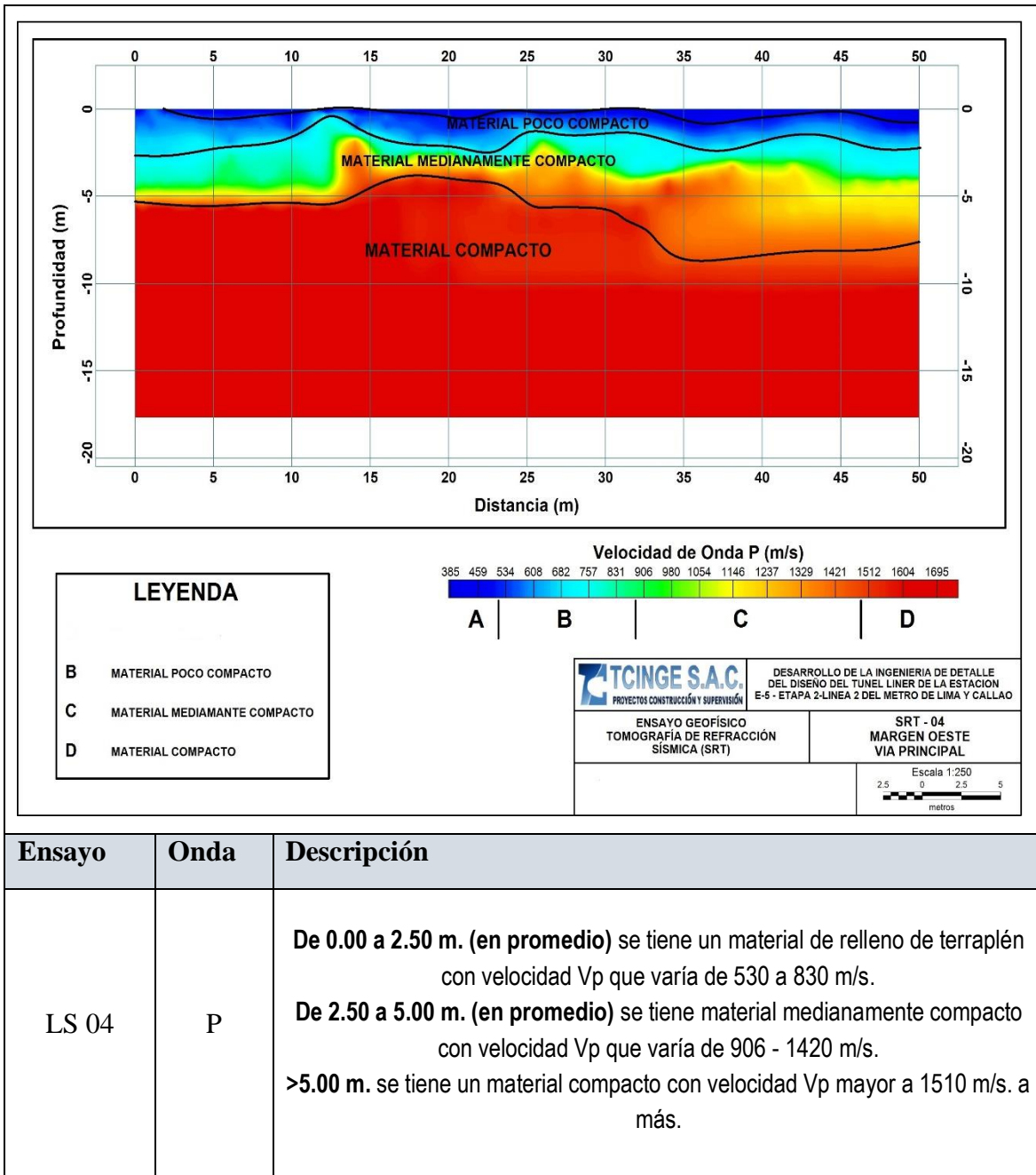
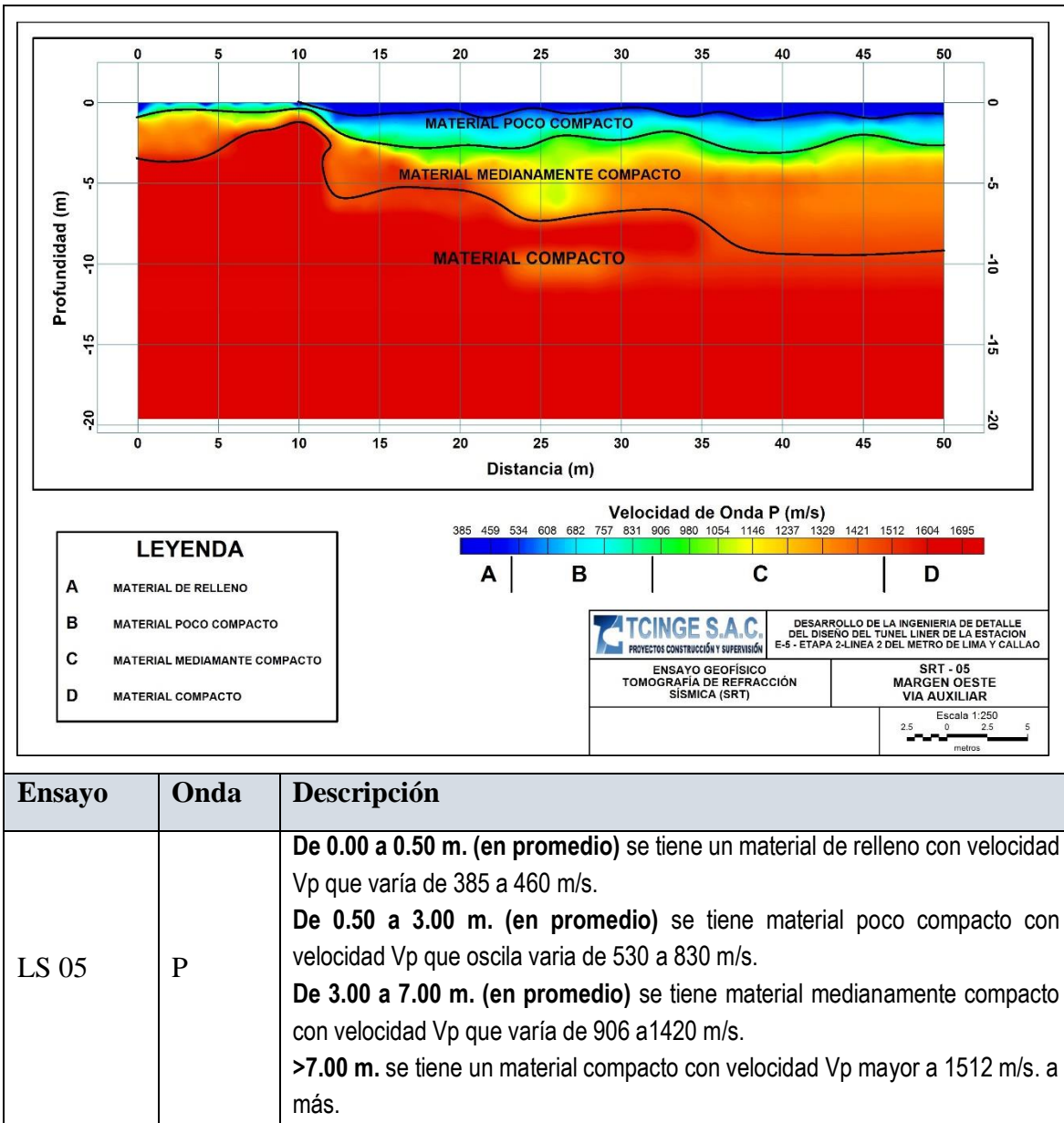


Tabla 53: Resultado LS 05



Anexo D: Medición de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales (MASW)

De acuerdo a las velocidades promedios de las ondas S (de los 30 m más superficiales, Vs30) resultantes, se hizo una caracterización sísmica del suelo, tomando como referencia al código internacional IBC del 2009 (International Building Code)

Los siguientes cuadros muestran las velocidades de corte calculadas a partir de los ensayos MASW.

Tabla 54: Resumen de ensayos MASW (Profundidad de alcance de cada ensayos es 30.0m)

MASW	Tipo onda	Coordenadas de UTM (WGS84)		Periodo Fundamental Ts (s)	Vs30 (m/s)	según IBC		Según Norma E.030	
		Este	Norte			Tipo	Clasificación	Tipo	Clasificación
MASW 01	S	271642	8666548	0.26	455	C	Suelo denso muy	S2	Suelo Intermedio
MASW 02	S	271634	8666547	0.25	474	C	Suelo denso muy	S2	Suelo Intermedio
MASW 03	S	271625	8666548	0.26	457	C	Suelo denso muy	S2	Suelo Intermedio
MASW 04	S	271613	8666546	0.26	466	C	Suelo denso muy	S2	Suelo Intermedio
MASW 05	S	271603	8666545	0.27	449	C	Suelo denso muy	S2	Suelo Intermedio

Tabla 55: Resultado MASW 01

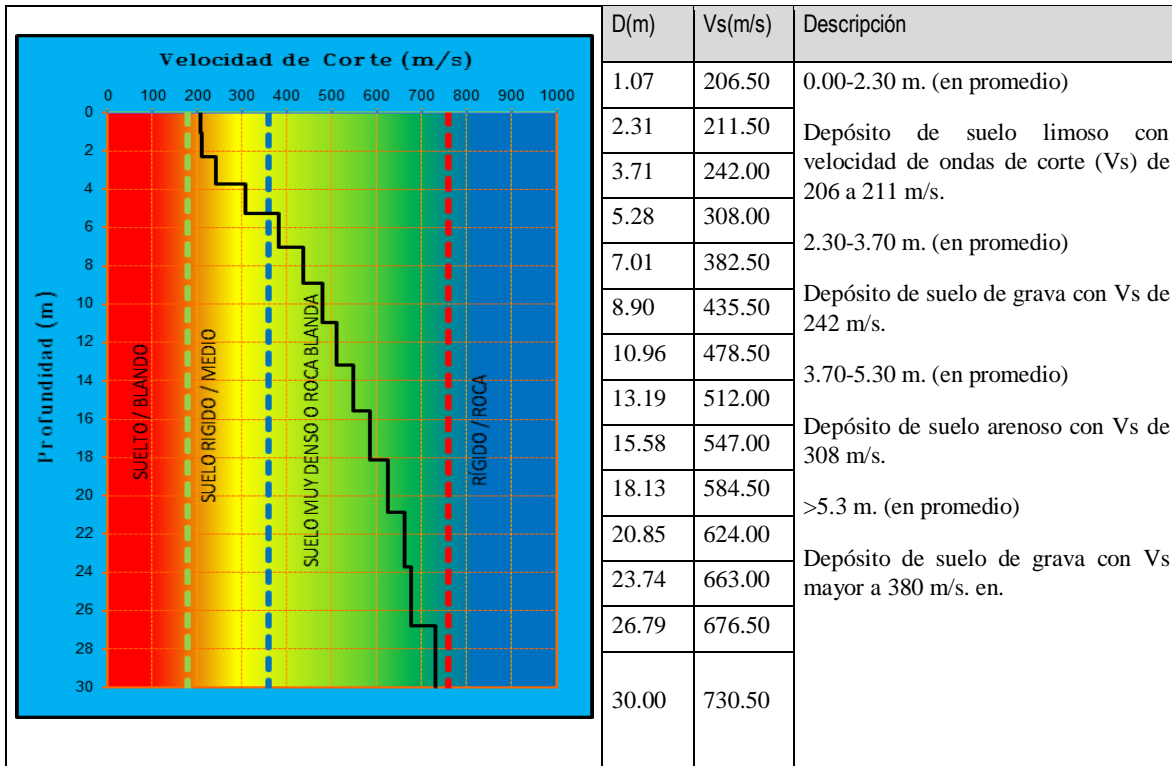


Tabla 56: Resultado MASW 02

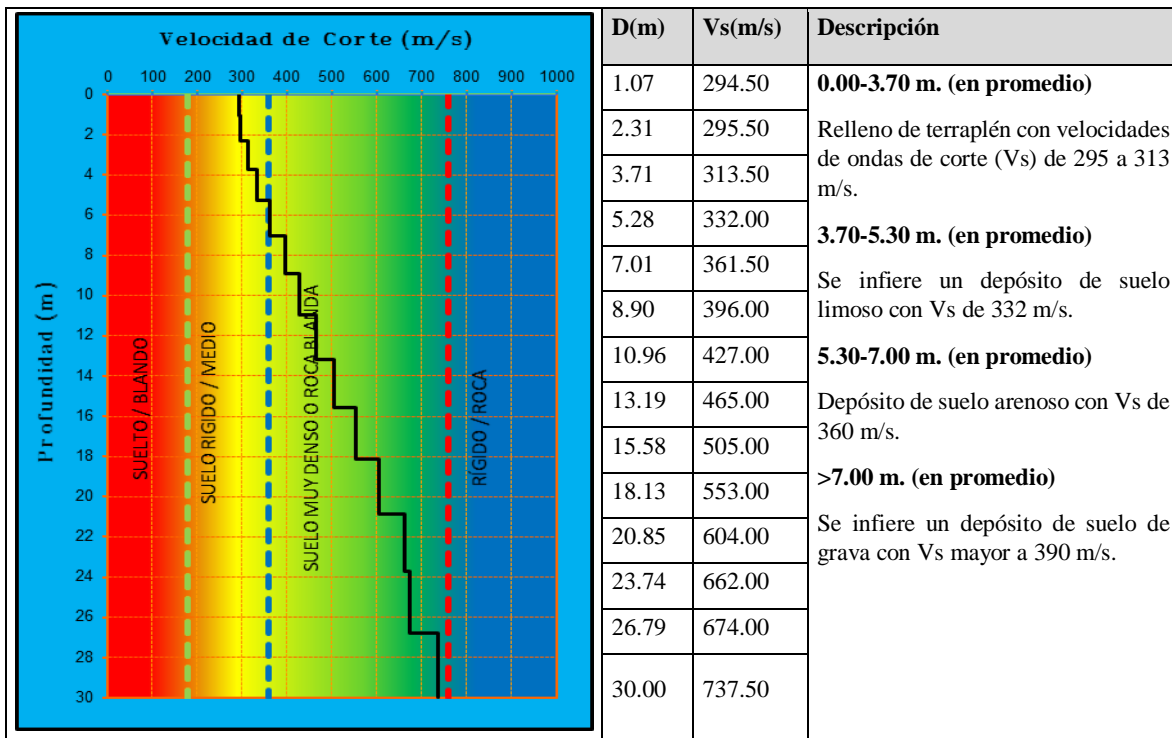


Tabla 57: Resultado MASW 03

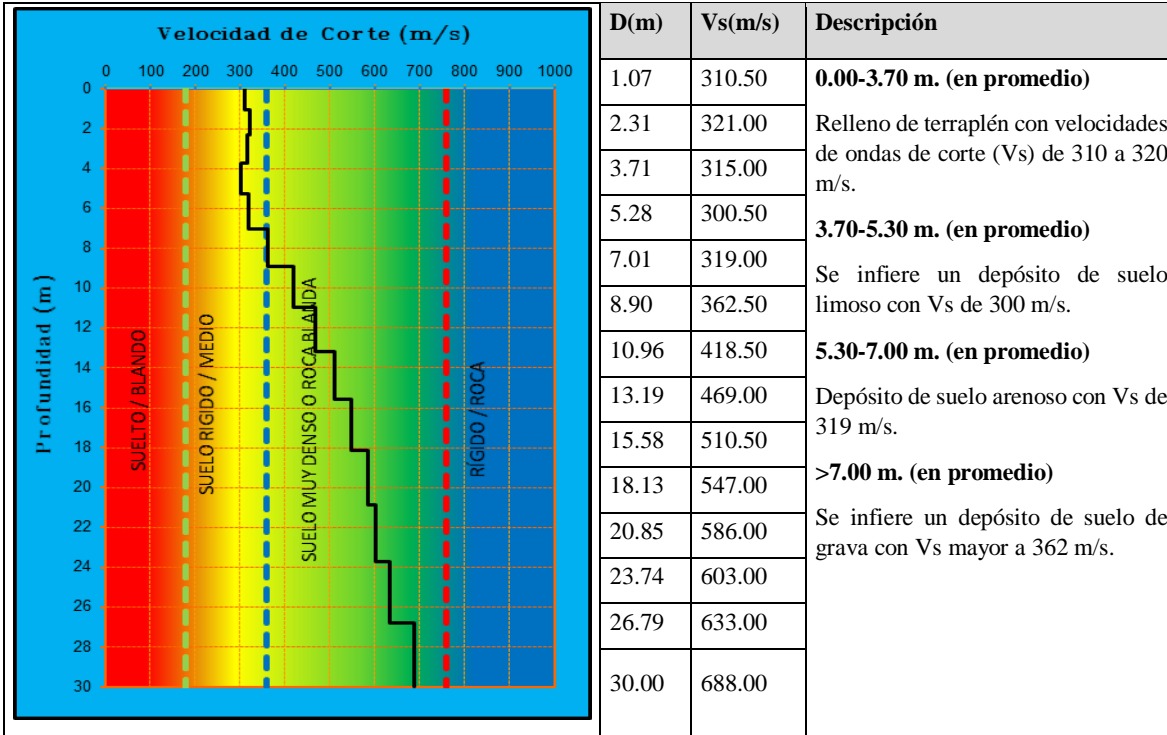


Tabla 58: Resultado MASW 04

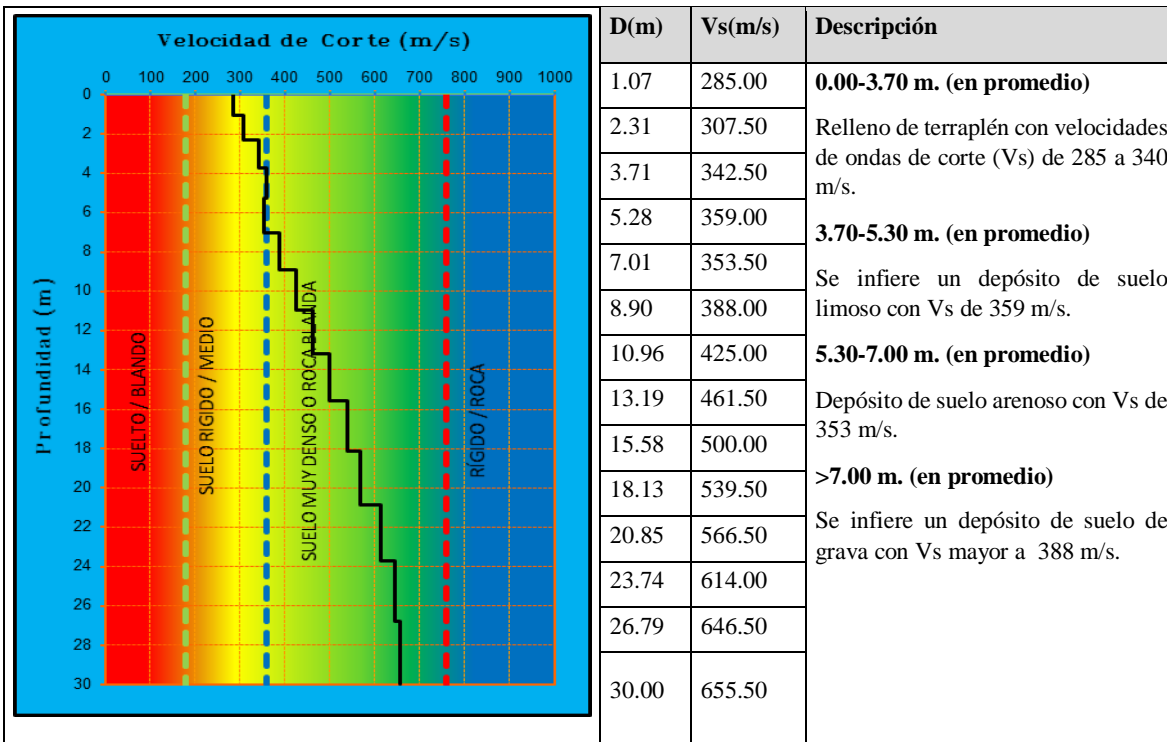
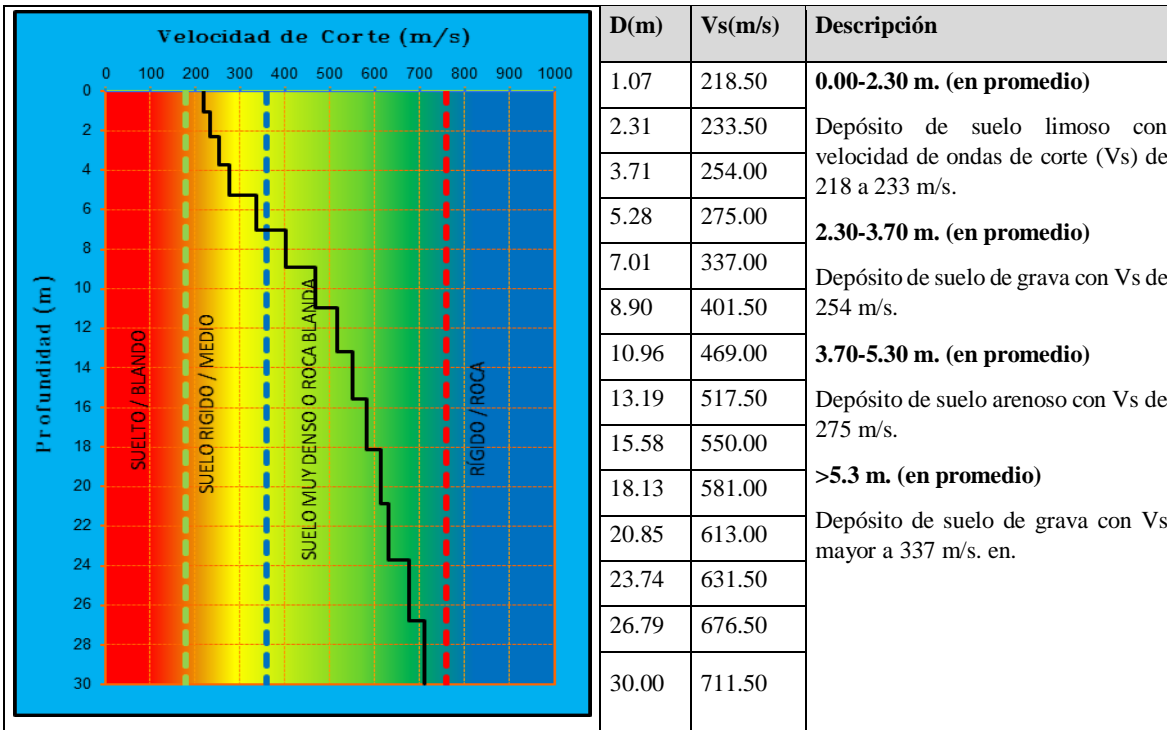


Tabla 59: Resultado MASW 05



Anexo E: Perfil Geotécnico.

La evaluación de campo y los resultados de ensayos de laboratorio han permitido caracterizar las condiciones físicas, de resistencia y rigidez de los suelos y materiales identificados que circundan el tunnel liner. A partir de ensayos de corte directo en estado inalterado para el caso de limo arenoso ML, arena limosa SM y arena mala graduada SP y disturbado para el caso de las gravas limosas GM y gravas mal graduadas GP se han obtenido los parámetros de resistencia, los parámetros de rigidez han sido evaluados a partir de la sensibilidad de resultados de los ensayos de compresión edométrica y ensayos geofísicos refracción sísmica y MASW.

Profundidad (m)	Tipo de Suelo	Vs (m/s)		Vp (m/s)		Densidad (KN/m ³)	Vp/Vs		n (poisson)		Gmax (Mpa)		Emax (Mpa)		Es (Tn/m ²)	
0,00 - 2,40	Limo Arenoso ML	206	211	459	980	15	2,228	4,645	0,37	0,48	65	68	178	201	1783	2009
2,40 - 3,40	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava limosa GM	242	242	980	1329	20,8	4,050	5,492	0,47	0,48	124	124	364	368	3645	3683
3,40 - 5,30	Arena limosa SM, Arena mal graduada SP, intercalacion de Grava limosa GM	308	308	1329	1604	15,2	4,315	5,208	0,47	0,48	147	147	433	435	4326	4353
5,30 - 6,00	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava mal graduada con arena GP	380	380	1604	1695	21	4,221	4,461	0,47	0,47	309	309	909	911	9090	9110

Figura 89: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 1 y MASW 1

Profundidad (m)	Tipo de Suelo	Vs (m/s)		Vp (m/s)		Densidad (KN/m ³)	Vp/Vs		n (poisson)		Gmax (Mpa)		Emax (Mpa)		Es (Tn/m ²)	
0,00 - 3,70	Relleno Terraplen	295	313	534	1237	20,0	1,810	3,952	0,28	0,47	177	200	454	586	4543	5855
3,70 - 5,30	Limo arenoso ML	332	332	1237	1512	15,2	3,726	4,554	0,46	0,47	171	171	499	504	4991	5037
5,30 - 7,00	Arena limosa SM, Arena mal graduada SP, intercalacion de Grava limosa GM	360	360	1329	1604	15,2	3,692	4,456	0,46	0,47	201	201	587	592	5865	5918
> 7,00	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava mal graduada con arena GP	390	390	1604	1695	21,0	4,113	4,346	0,47	0,47	326	326	956	959	9563	9586

Figura 90: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 2 y MASW 2

Profundidad (m)	Tipo de Suelo	Vs (m/s)		Vp (m/s)		Densidad (KN/m3)	Vp/Vs		n (poisson)		Gmax (Mpa)		Emax (Mpa)		Es (Tn/m2)	
0,00 - 3,70	Relleno Terraplen	310	320	534	831	20,0	1,72	2,60	0,25	0,41	196	209	488	590	4882	5900
3,70 - 5,30	Limo arenoso ML	300	300	831	906	15,2	2,77	3,02	0,43	0,44	139	139	397	401	3975	4012
5,30 - 7,00	Arena limosa SM, Arena mal graduada SP, intercalacion de Grava limosa GM	319	319	906	980	15,2	2,84	3,07	0,43	0,44	158	158	451	454	4507	4543
> 7,00	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava mal graduada con arena GP	362	362	980	1695	21,0	2,71	4,68	0,42	0,48	281	281	797	828	7972	8282

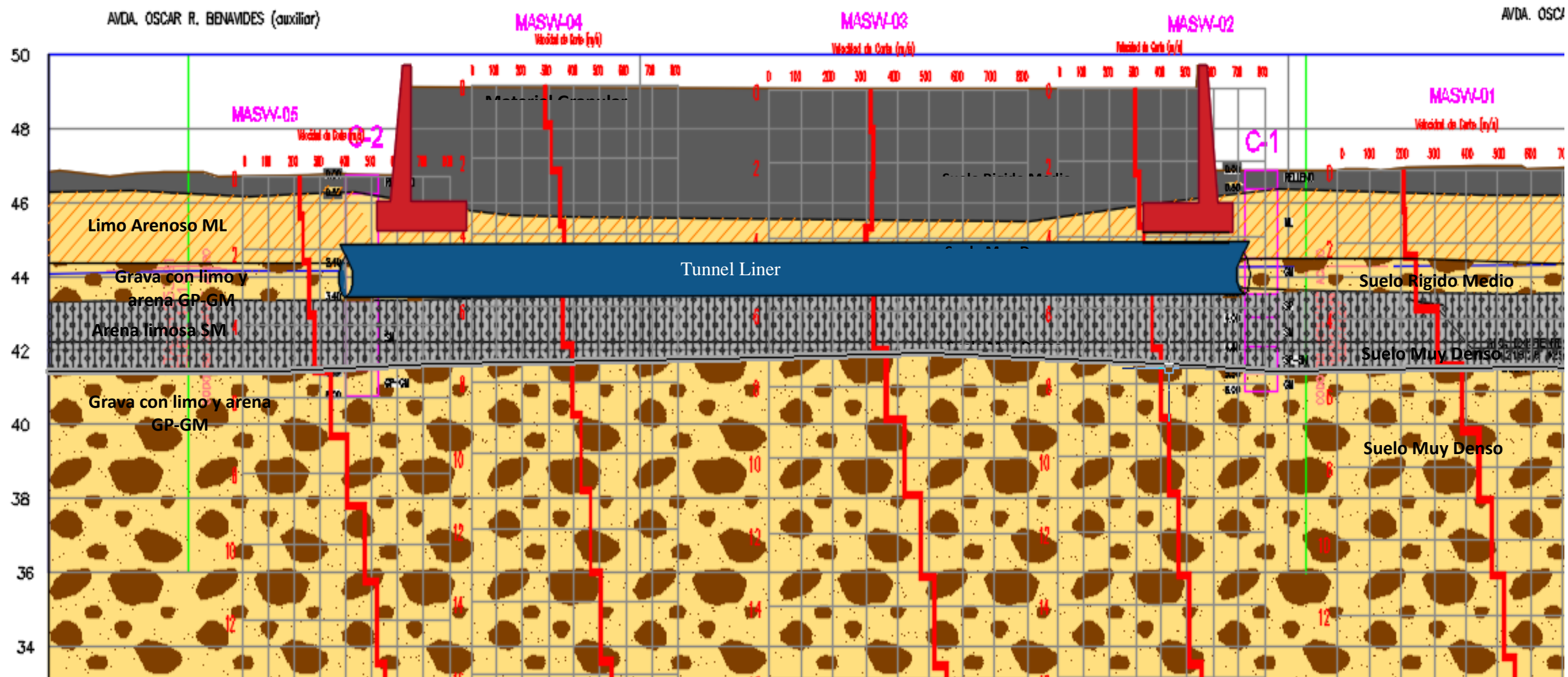
Figura 91: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 3 y MASW 3

Profundidad (m)	Tipo de Suelo	Vs (m/s)		Vp (m/s)		Densidad (KN/m3)	Vp/Vs		n (poisson)		Gmax (Mpa)		Emax (Mpa)		Es (Tn/m2)	
0,00 - 3,70	Relleno Terraplen	285	340	534	980	20,0	1,87	2,88	0,30	0,43	166	236	431	675	4308	6748
3,70 - 5,30	Limo arenoso ML	359	359	831	906	15,2	2,31	2,52	0,39	0,41	200	200	553	562	5533	5619
5,30 - 7,00	Arena limosa SM, Arena mal graduada SP, intercalacion de Grava limosa GM	353	353	1421	1421	15,2	4,03	4,03	0,47	0,47	193	193	567	567	5665	5665
> 7,00	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava mal graduada con arena GP	388	388	1558	1695	21,0	4,02	4,37	0,47	0,47	322	322	945	949	9455	9490

Figura 92: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 4 y MASW 4

Profundidad (m)	Tipo de Suelo	Vs (m/s)		Vp (m/s)		Densidad (KN/m3)	Vp/Vs		n (poisson)		Gmax (Mpa)		Emax (Mpa)		Es (Tn/m2)	
0,00 - 2,40	Limo Arenoso ML	218	233	534	757	15	2,450	3,249	0,40	0,45	73	83	203	240	2035	2403
2,40 - 3,40	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava limosa GM	254	254	1054	1146	20,8	4,150	4,512	0,47	0,47	137	137	402	403	4019	4033
3,40 - 5,30	Arena limosa SM, Arena mal graduada SP, intercalacion de Grava limosa GM	275	275	1146	1237	15,2	4,167	4,498	0,47	0,47	117	117	344	345	3444	3454
5,30 - 6,00	Grava mal graduada con limo y arena GP-GM, Grava mal graduada con arena GP	337	337	1237	1604	21	3,671	4,760	0,46	0,48	243	243	710	718	7099	7181

Figura 93: Parámetros Sísmicos y Rigidez Línea de Refracción Sísmica 5 y MASW 5



Anexo F: Ensayos de Laboratorio

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N° : TC-48-LG-75-2017
SOLICITANTE : COSAPI S.A.
DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046
PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT
UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL
CANTERA : --
CALICATA : C-1
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD (m) : 0,85 - 1,85
CLASIFICACION (S.U.C.S.) : ML
TIPO DE MUESTRA : INALTERADO
CONDICION DE HUMEDAD : NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
FECHA DE RECEPCIÓN: 25/05/2017
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017
APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL : PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
TIPO DE DEFORMACION : DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA

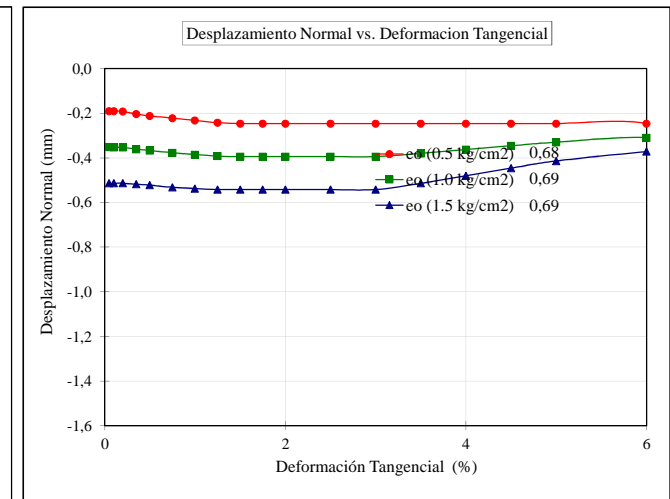
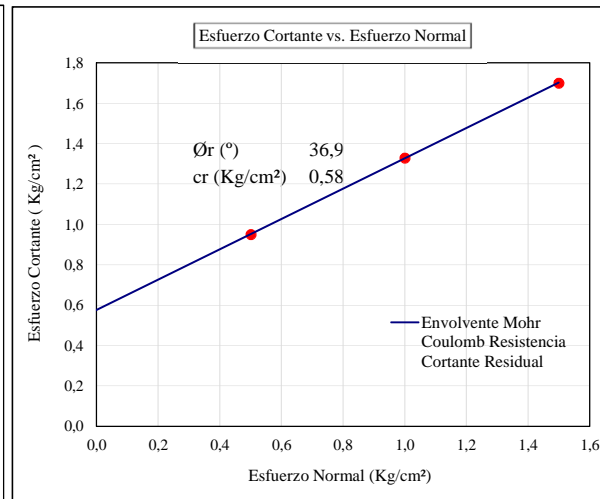
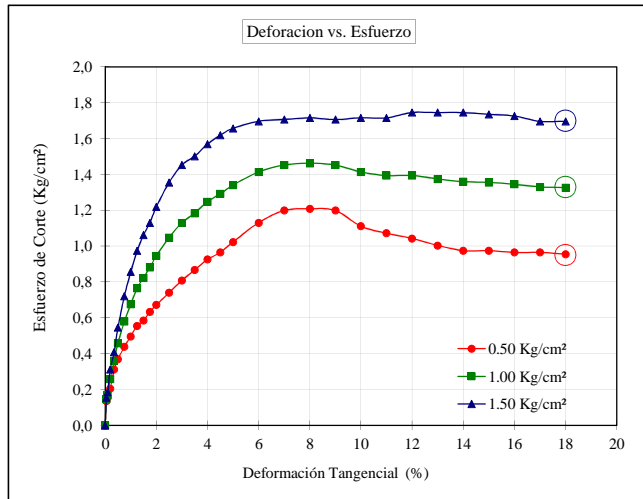
DATOS DEL ESPECIMEN	ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura (h)	(cm) 2,12	1,97	2,12	2,03	2,12	2,09
Ancho (φ)	(cm) 6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Densidad Total (γ _t)	(g/cm ³) 1,75	1,88	1,75	1,82	1,75	1,77
Densidad Seca (γ _d)	(g/cm ³) 1,57	1,69	1,57	1,64	1,57	1,58
Humedad (ω)	(%) 11,42	11,00	11,42	11,25	11,42	11,49
Relacion de Vacios (e)	0,68	0,56	0,69	0,62	0,69	0,67
Grado de Saturación (S)	(%) 44,28	51,09	44,03	47,31	43,79	44,11
Velocidad Deformacion Tangencial	(mm/min)	0,93		0,62		0,93
Esfuerzo Normal	(Kg/cm ²)	0,50		1,00		1,50

Deform. Tangencial (%)	ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	
0,05	0,14	0,27	0,05	0,15	0,15	0,05	0,16	0,10	
0,10	0,16	0,31	0,10	0,17	0,17	0,10	0,18	0,12	
0,20	0,20	0,41	0,20	0,26	0,26	0,20	0,31	0,21	
0,35	0,31	0,62	0,35	0,36	0,36	0,35	0,41	0,27	
0,50	0,37	0,74	0,50	0,46	0,46	0,50	0,55	0,36	
0,75	0,44	0,88	0,75	0,58	0,58	0,75	0,72	0,48	
1,00	0,50	0,99	1,00	0,68	0,68	1,00	0,86	0,57	
1,25	0,56	1,11	1,25	0,76	0,76	1,25	0,97	0,65	
1,50	0,58	1,17	1,50	0,82	0,82	1,50	1,06	0,71	
1,75	0,63	1,27	1,75	0,88	0,88	1,75	1,13	0,75	
2,00	0,67	1,34	2,00	0,95	0,95	2,00	1,22	0,81	
2,50	0,74	1,48	2,50	1,05	1,05	2,50	1,35	0,90	
3,00	0,81	1,62	3,00	1,13	1,13	3,00	1,45	0,97	
3,50	0,87	1,73	3,50	1,18	1,18	3,50	1,50	1,00	
4,00	0,93	1,85	4,00	1,25	1,25	4,00	1,57	1,05	
4,50	0,96	1,93	4,50	1,29	1,29	4,50	1,62	1,08	
5,00	1,02	2,05	5,00	1,34	1,34	5,00	1,66	1,10	
6,00	1,13	2,26	6,00	1,41	1,41	6,00	1,70	1,13	
7,00	1,20	2,40	7,00	1,45	1,45	7,00	1,71	1,14	
8,00	1,21	2,42	8,00	1,46	1,46	8,00	1,72	1,14	
9,00	1,20	2,40	9,00	1,45	1,45	9,00	1,71	1,14	
10,00	1,11	2,22	10,00	1,41	1,41	10,00	1,72	1,14	
11,00	1,07	2,14	11,00	1,39	1,39	11,00	1,72	1,14	
12,00	1,04	2,09	12,00	1,39	1,39	12,00	1,75	1,16	
13,00	1,00	2,01	13,00	1,37	1,37	13,00	1,75	1,16	
14,00	0,97	1,95	14,00	1,36	1,36	14,00	1,75	1,16	
15,00	0,97	1,95	15,00	1,35	1,35	15,00	1,74	1,16	
16,00	0,96	1,93	16,00	1,35	1,35	16,00	1,73	1,15	
17,00	0,96	1,93	17,00	1,33	1,33	17,00	1,70	1,13	
18,00	0,95	1,91	18,00	1,33	1,33	18,00	1,70	1,13	
19,00			19,00			19,00			
20,00			20,00			20,00			
21,00			21,00			21,00			
22,00			22,00			22,00			
23,00			23,00			23,00			
24,00			24,00			24,00			
25,00			25,00			25,00			

OBSERVACION : La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
 El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N°	: TC-48-LG-75-2017	CANTERA	: --	TIPO DE MUESTRA	: INALTERADO
SOLICITANTE	: COSAPI S.A.	CALICATA	: C-1	CONDICION DE HUMEDAD	: NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
DIRECCIÓN	: Av República de Colombia 791, San Isidro 15046	MUESTRA	: M-1	APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL	: PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
PROYECTO	: DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT	PROFUNDIDAD	: 0,85 - 1,85	TIPO DE DEFORMACION	: DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA
UBICACIÓN	: AV. FAUCETT - AV. COLONIAL	CLASIFICACION SUCS	: ML	FECHA DE EMISION	: 31/05/2017
FECHA DE RECEPCIÓN	: 25/05/2017	FECHA DE ENSAYO	: 30/05/2017		



OBSERVACION :

La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y humedad a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante. El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006). ϕ_r , cr, ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia residual, respectivamente. ϕ_p , cp ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia máxima, respectivamente

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N° : TC-48-LG-76-2017
SOLICITANTE : COSAPI S.A.
DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046
PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT
UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL
CANTERA : --
CALICATA : C-1
MUESTRA : M-2
PROFUNDIDAD (m) : 1,85 - 2,20
CLASIFICACION (S.U.C.S.) : ML
TIPO DE MUESTRA : INALTERADO
CONDICION DE HUMEDAD : NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
FECHA DE RECEPCIÓN: 25/05/2017
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017
APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL : PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
TIPO DE DEFORMACION : DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA

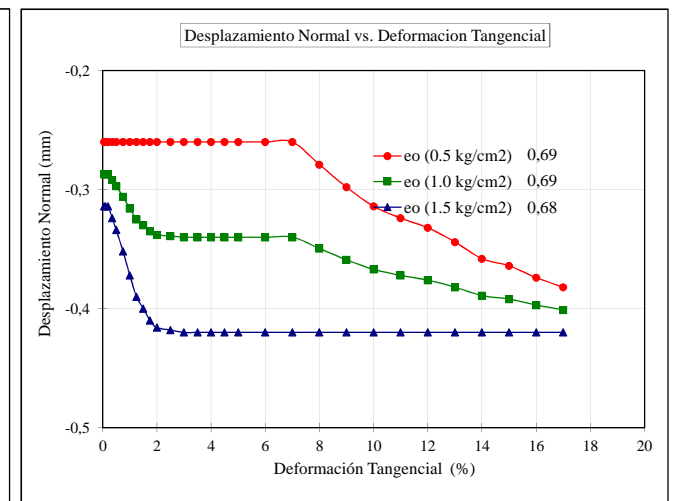
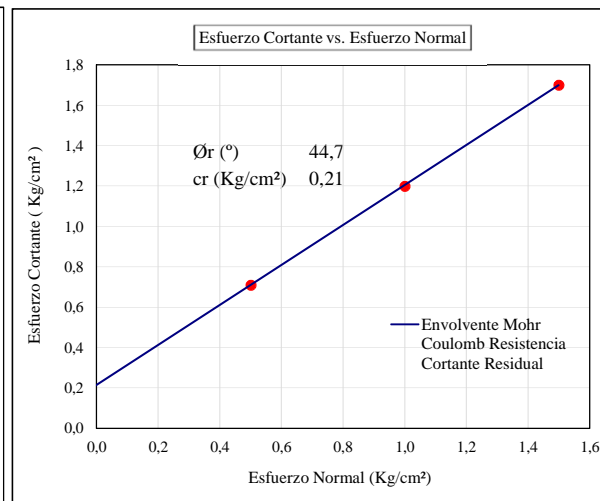
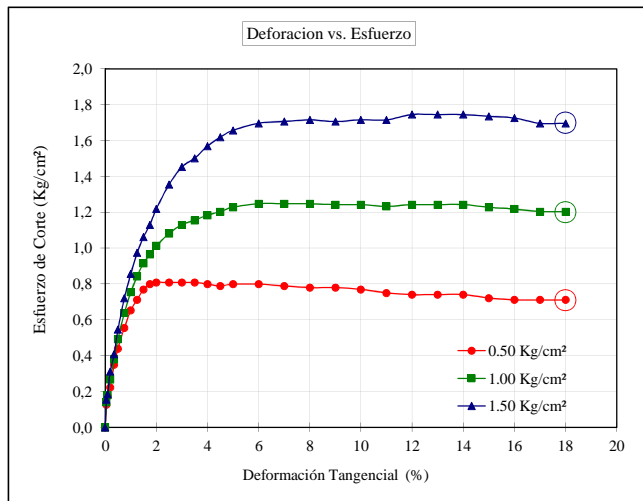
DATOS DEL ESPECIMEN	ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura (h)	(cm) 2,12	2,08	2,12	2,08	2,12	2,08
Ancho (φ)	(cm) 6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Densidad Total (γ _t)	(g/cm ³) 1,75	1,78	1,76	1,78	1,76	1,79
Densidad Seca (γ _d)	(g/cm ³) 1,57	1,60	1,57	1,60	1,57	1,61
Humedad (ω)	(%) 11,72	11,00	11,72	11,12	11,72	11,23
Relacion de Vacios (e)	0,69	0,66	0,69	0,65	0,68	0,65
Grado de Saturación (S)	(%) 45,06	45,29	45,23	45,74	45,40	46,21
Velocidad Deformacion Tangencial	(mm/min)	0,93		0,62		0,93
Esfuerzo Normal	(Kg/cm ²)	0,50		1,00		1,50

Deform. Tangencial (%)	ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	
0,05	0,13	0,25	0,05	0,14	0,14	0,05	0,16	0,10	
0,10	0,17	0,35	0,10	0,18	0,18	0,10	0,18	0,12	
0,20	0,22	0,45	0,20	0,27	0,27	0,20	0,31	0,21	
0,35	0,35	0,70	0,35	0,38	0,38	0,35	0,41	0,27	
0,50	0,44	0,88	0,50	0,49	0,49	0,50	0,55	0,36	
0,75	0,56	1,11	0,75	0,64	0,64	0,75	0,72	0,48	
1,00	0,65	1,31	1,00	0,76	0,76	1,00	0,86	0,57	
1,25	0,71	1,42	1,25	0,84	0,84	1,25	0,97	0,65	
1,50	0,77	1,54	1,50	0,92	0,92	1,50	1,06	0,71	
1,75	0,80	1,60	1,75	0,96	0,96	1,75	1,13	0,75	
2,00	0,81	1,62	2,00	1,01	1,01	2,00	1,22	0,81	
2,50	0,81	1,62	2,50	1,08	1,08	2,50	1,35	0,90	
3,00	0,81	1,62	3,00	1,13	1,13	3,00	1,45	0,97	
3,50	0,81	1,62	3,50	1,15	1,15	3,50	1,50	1,00	
4,00	0,80	1,60	4,00	1,18	1,18	4,00	1,57	1,05	
4,50	0,79	1,58	4,50	1,20	1,20	4,50	1,62	1,08	
5,00	0,80	1,60	5,00	1,23	1,23	5,00	1,66	1,10	
6,00	0,80	1,60	6,00	1,25	1,25	6,00	1,70	1,13	
7,00	0,79	1,58	7,00	1,25	1,25	7,00	1,71	1,14	
8,00	0,78	1,56	8,00	1,25	1,25	8,00	1,72	1,14	
9,00	0,78	1,56	9,00	1,24	1,24	9,00	1,71	1,14	
10,00	0,77	1,54	10,00	1,24	1,24	10,00	1,72	1,14	
11,00	0,75	1,50	11,00	1,23	1,23	11,00	1,72	1,14	
12,00	0,74	1,48	12,00	1,24	1,24	12,00	1,75	1,16	
13,00	0,74	1,48	13,00	1,24	1,24	13,00	1,75	1,16	
14,00	0,74	1,48	14,00	1,24	1,24	14,00	1,75	1,16	
15,00	0,72	1,44	15,00	1,23	1,23	15,00	1,74	1,16	
16,00	0,71	1,42	16,00	1,22	1,22	16,00	1,73	1,15	
17,00	0,71	1,42	17,00	1,20	1,20	17,00	1,70	1,13	
18,00	0,71	1,42	18,00	1,20	1,20	18,00	1,70	1,13	
19,00			19,00			19,00			
20,00			20,00			20,00			
21,00			21,00			21,00			
22,00			22,00			22,00			
23,00			23,00			23,00			
24,00			24,00			24,00			
25,00			25,00			25,00			

OBSERVACION : La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
 El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N°	: TC-48-LG-76-2017	CANTERA	: --	TIPO DE MUESTRA	: INALTERADO
SOLICITANTE	: COSAPI S.A.	CALICATA	: C-1	CONDICION DE HUMEDAD	: NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
DIRECCIÓN	: Av República de Colombia 791, San Isidro 15046	MUESTRA	: M-2	APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL	: PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
PROYECTO	: DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT	PROFUNDIDAD	: 1,85 - 2,20	TIPO DE DEFORMACION	: DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA
UBICACIÓN	: AV. FAUCETT - AV. COLONIAL	CLASIFICACION SUCS	: ML	FECHA DE EMISION	: 31/05/2017
FECHA DE RECEPCIÓN	: 25/05/2017	FECHA DE ENSAYO	: 30/05/2017		



OBSERVACION :

La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante. El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006). Ør , c_r , ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia residual, respectivamente. Øp , c_p ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia máxima, respectivamente

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N° : TC-48-LG-78-2017
SOLICITANTE : COSAPI S.A.
DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046
PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT
UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL
CANTERA : --
CALICATA : C-1
MUESTRA : M-6
PROFUNDIDAD (m) : 4,80 - 5,20
CLASIFICACION (S.U.C.S.) : GM
TIPO DE MUESTRA : REMOLDEADO
CONDICION DE HUMEDAD : NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
FECHA DE RECEPCIÓN: 25/05/2017
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017
APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL : PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
TIPO DE DEFORMACION : DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA

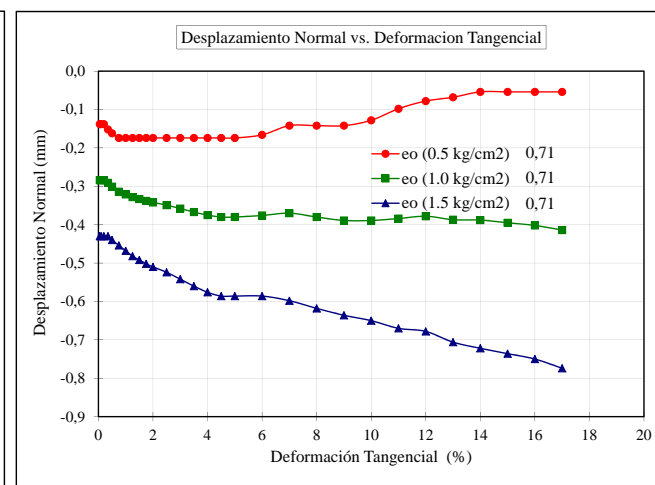
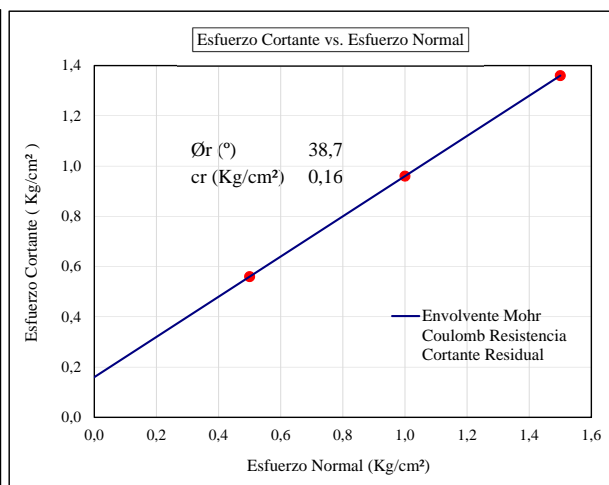
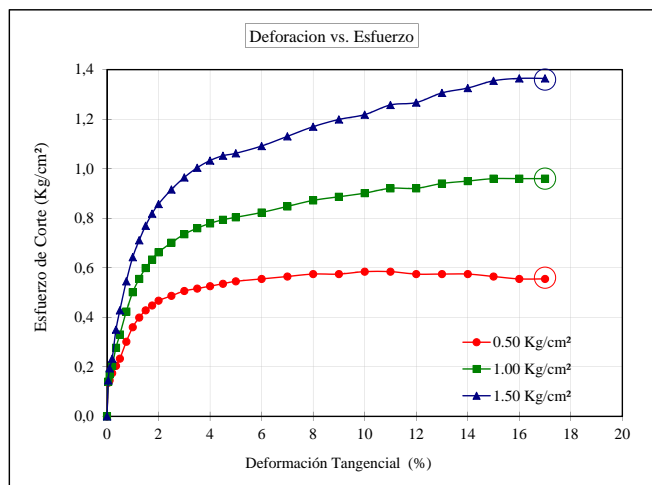
DATOS DEL ESPECIMEN	ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura (h)	(cm) 2,12	2,11	2,12	2,08	2,12	2,04
Ancho (φ)	(cm) 6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Densidad Total (γ _t)	(g/cm ³) 1,74	1,74	1,74	1,77	1,74	1,80
Densidad Seca (γ _d)	(g/cm ³) 1,55	1,55	1,55	1,58	1,55	1,61
Humedad (w)	(%) 12,45	11,84	12,45	11,84	12,45	11,83
Relacion de Vacios (e)	0,71	0,71	0,71	0,68	0,71	0,65
Grado de Saturación (S)	(%) 46,47	44,21	46,47	46,28	46,47	48,52
Velocidad Deformacion Tangencial	(mm/min)	0,93		0,62		0,93
Esfuerzo Normal	(Kg/cm ²)	0,50		1,00		1,50

Deform. Tangencial (%)	ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	
0,05	0,14	0,27	0,05	0,14	0,14	0,05	0,15	0,10	
0,10	0,15	0,29	0,10	0,17	0,17	0,10	0,19	0,13	
0,20	0,17	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,23	0,16	
0,35	0,20	0,41	0,35	0,28	0,28	0,35	0,35	0,23	
0,50	0,23	0,47	0,50	0,33	0,33	0,50	0,43	0,29	
0,75	0,30	0,60	0,75	0,42	0,42	0,75	0,55	0,36	
1,00	0,36	0,72	1,00	0,50	0,50	1,00	0,64	0,43	
1,25	0,40	0,80	1,25	0,56	0,56	1,25	0,71	0,47	
1,50	0,43	0,86	1,50	0,60	0,60	1,50	0,77	0,51	
1,75	0,45	0,90	1,75	0,63	0,63	1,75	0,82	0,55	
2,00	0,47	0,93	2,00	0,66	0,66	2,00	0,86	0,57	
2,50	0,49	0,97	2,50	0,70	0,70	2,50	0,92	0,61	
3,00	0,51	1,01	3,00	0,74	0,74	3,00	0,96	0,64	
3,50	0,52	1,03	3,50	0,76	0,76	3,50	1,00	0,67	
4,00	0,53	1,05	4,00	0,78	0,78	4,00	1,03	0,69	
4,50	0,54	1,07	4,50	0,79	0,79	4,50	1,05	0,70	
5,00	0,55	1,09	5,00	0,80	0,80	5,00	1,06	0,71	
6,00	0,56	1,11	6,00	0,82	0,82	6,00	1,09	0,73	
7,00	0,56	1,13	7,00	0,85	0,85	7,00	1,13	0,75	
8,00	0,57	1,15	8,00	0,87	0,87	8,00	1,17	0,78	
9,00	0,57	1,15	9,00	0,89	0,89	9,00	1,20	0,80	
10,00	0,58	1,17	10,00	0,90	0,90	10,00	1,22	0,81	
11,00	0,58	1,17	11,00	0,92	0,92	11,00	1,26	0,84	
12,00	0,57	1,15	12,00	0,92	0,92	12,00	1,27	0,84	
13,00	0,57	1,15	13,00	0,94	0,94	13,00	1,31	0,87	
14,00	0,57	1,15	14,00	0,95	0,95	14,00	1,33	0,88	
15,00	0,56	1,13	15,00	0,96	0,96	15,00	1,35	0,90	
16,00	0,56	1,11	16,00	0,96	0,96	16,00	1,36	0,91	
17,00	0,56	1,11	17,00	0,96	0,96	17,00	1,36	0,91	
18,00			18,00			18,00			
19,00			19,00			19,00			
20,00			20,00			20,00			
21,00			21,00			21,00			
22,00			22,00			22,00			
23,00			23,00			23,00			
24,00			24,00			24,00			
25,00			25,00			25,00			

OBSERVACION : La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
 El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N°	: TC-48-LG-78-2017	CANTERA	: --	TIPO DE MUESTRA	: REMOLDEADO
SOLICITANTE	: COSAPI S.A.	CALICATA	: C-1	CONDICION DE HUMEDAD	: NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
DIRECCIÓN	: Av República de Colombia 791, San Isidro 15046	MUESTRA	: M-6	APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL	: PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
PROYECTO	: DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT	PROFUNDIDAD	: 4,80 - 5,20	TIPO DE DEFORMACION	: DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA
UBICACIÓN	: AV. FAUCETT - AV. COLONIAL	CLASIFICACION SUCS	: GM	FECHA DE EMISION	: 31/05/2017
FECHA DE RECEPCIÓN	: 25/05/2017	FECHA DE ENSAYO	: 30/05/2017		



OBSERVACION :

La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).
Ør, cr, ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia residual, respectivamente. Øp, cp ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia máxima, respectivamente

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N° : TC-48-LG-170-2017
SOLICITANTE : COSAPI S.A.
DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046
PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT
UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL
CANTERA : --
CALICATA : C-2
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD (m) : 0,60 - 1,60
CLASIFICACION (S.U.C.S.) : ML
TIPO DE MUESTRA : INALTERADO
CONDICION DE HUMEDAD : NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
FECHA DE RECEPCIÓN: 25/05/2017
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017
APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL : PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
TIPO DE DEFORMACION : DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA

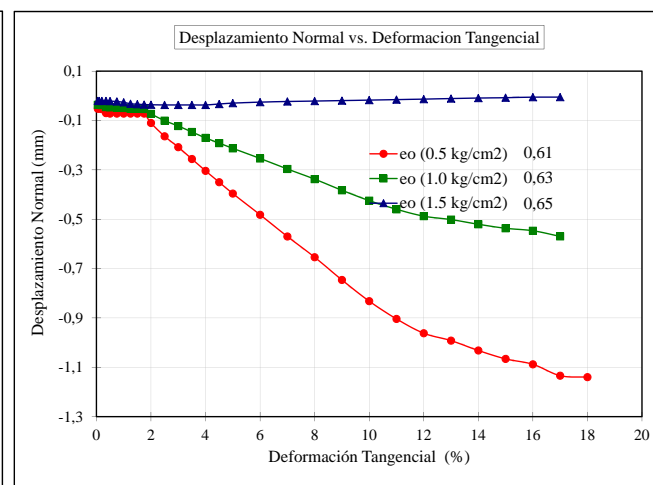
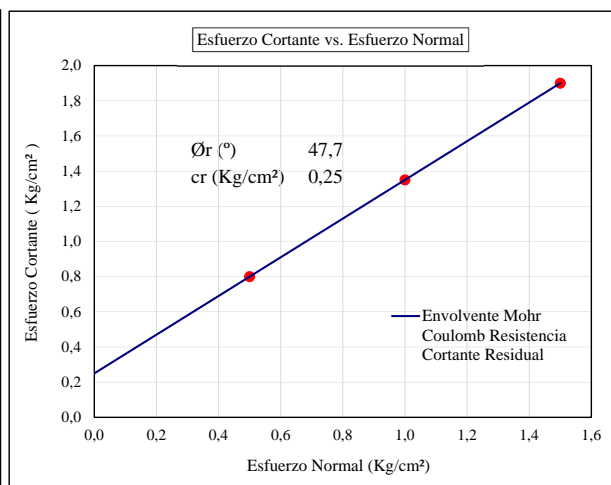
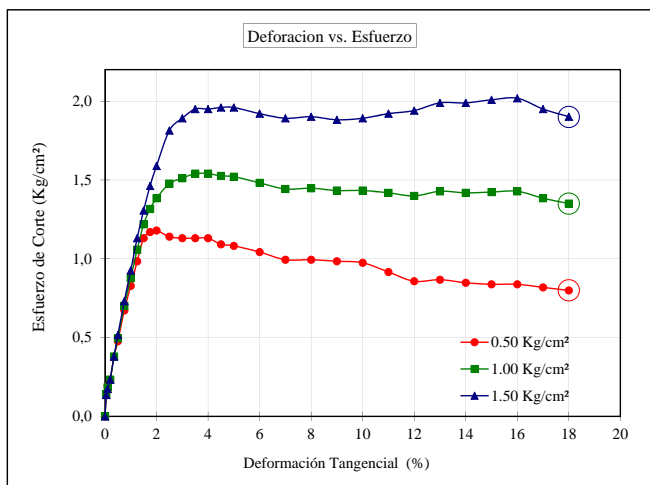
DATOS DEL ESPECIMEN	ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura (h)	(cm) 2,12	2,01	2,12	2,06	2,12	2,11
Ancho (φ)	(cm) 6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Densidad Total (γ _t)	(g/cm ³) 1,81	1,91	1,79	1,83	1,77	1,77
Densidad Seca (γ _d)	(g/cm ³) 1,64	1,74	1,63	1,67	1,61	1,62
Humedad (w)	(%) 9,86	9,73	9,86	9,58	9,86	9,43
Relacion de Vacios (e)	0,61	0,53	0,63	0,58	0,65	0,64
Grado de Saturación (S)	(%) 42,63	48,98	41,47	43,92	40,35	39,70
Velocidad Deformacion Tangencial	(mm/min)	0,94		0,62		0,93
Esfuerzo Normal	(Kg/cm ²)	0,50		1,00		1,50

Deform. Tangencial (%)	ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	
0,05	0,15	0,29	0,05	0,14	0,14	0,05	0,14	0,09	
0,10	0,19	0,39	0,10	0,18	0,18	0,10	0,17	0,12	
0,20	0,23	0,47	0,20	0,23	0,23	0,20	0,23	0,16	
0,35	0,38	0,76	0,35	0,38	0,38	0,35	0,38	0,25	
0,50	0,48	0,95	0,50	0,50	0,50	0,50	0,52	0,34	
0,75	0,67	1,34	0,75	0,70	0,70	0,75	0,73	0,49	
1,00	0,83	1,66	1,00	0,88	0,88	1,00	0,93	0,62	
1,25	0,98	1,97	1,25	1,06	1,06	1,25	1,13	0,75	
1,50	1,13	2,26	1,50	1,22	1,22	1,50	1,31	0,87	
1,75	1,17	2,34	1,75	1,32	1,32	1,75	1,46	0,97	
2,00	1,18	2,36	2,00	1,38	1,38	2,00	1,59	1,06	
2,50	1,14	2,28	2,50	1,48	1,48	2,50	1,81	1,21	
3,00	1,13	2,26	3,00	1,51	1,51	3,00	1,89	1,26	
3,50	1,13	2,26	3,50	1,54	1,54	3,50	1,95	1,30	
4,00	1,13	2,26	4,00	1,54	1,54	4,00	1,95	1,30	
4,50	1,09	2,18	4,50	1,53	1,53	4,50	1,96	1,31	
5,00	1,08	2,16	5,00	1,52	1,52	5,00	1,96	1,31	
6,00	1,04	2,09	6,00	1,48	1,48	6,00	1,92	1,28	
7,00	0,99	1,99	7,00	1,44	1,44	7,00	1,89	1,26	
8,00	0,99	1,99	8,00	1,45	1,45	8,00	1,90	1,27	
9,00	0,98	1,97	9,00	1,43	1,43	9,00	1,88	1,25	
10,00	0,97	1,95	10,00	1,43	1,43	10,00	1,89	1,26	
11,00	0,92	1,83	11,00	1,42	1,42	11,00	1,92	1,28	
12,00	0,86	1,71	12,00	1,40	1,40	12,00	1,94	1,29	
13,00	0,87	1,73	13,00	1,43	1,43	13,00	1,99	1,33	
14,00	0,85	1,70	14,00	1,42	1,42	14,00	1,99	1,33	
15,00	0,84	1,68	15,00	1,42	1,42	15,00	2,01	1,34	
16,00	0,84	1,68	16,00	1,43	1,43	16,00	2,02	1,35	
17,00	0,82	1,64	17,00	1,38	1,38	17,00	1,95	1,30	
18,00	0,80	1,60	18,00	1,35	1,35	18,00	1,90	1,27	
19,00			19,00			19,00			
20,00			20,00			20,00			
21,00			21,00			21,00			
22,00			22,00			22,00			
23,00			23,00			23,00			
24,00			24,00			24,00			
25,00			25,00			25,00			

OBSERVACION : La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
 El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N°	: TC-48-LG-170-2017	CANTERA	: --	TIPO DE MUESTRA	: INALTERADO
SOLICITANTE	: COSAPI S.A.	CALICATA	: C-2	CONDICION DE HUMEDAD	: NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
DIRECCIÓN	: Av República de Colombia 791, San Isidro 15046	MUESTRA	: M-1	APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL	: PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
PROYECTO	: DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT	PROFUNDIDAD	: 0,60 - 1,60	TIPO DE DEFORMACION	: DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA
UBICACIÓN	: AV. FAUCETT - AV. COLONIAL	CLASIFICACION SUCS	: ML	FECHA DE EMISION	: 31/05/2017
FECHA DE RECEPCIÓN	: 25/05/2017	FECHA DE ENSAYO	: 30/05/2017		



OBSERVACION :

La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).
Ør, cr, ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia residual, respectivamente. Øp, cp ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia máxima, respectivamente

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N° : TC-48-LG-171-2017
SOLICITANTE : COSAPI S.A.
DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046
PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT
UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL
CANTERA : --
CALICATA : C-2
MUESTRA : M-2
PROFUNDIDAD (m) : 1,60 - 2,40
CLASIFICACION (S.U.C.S.) : ML
TIPO DE MUESTRA : INALTERADO
CONDICION DE HUMEDAD : NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
FECHA DE RECEPCIÓN: 25/05/2017
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017
APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL : PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
TIPO DE DEFORMACION : DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA

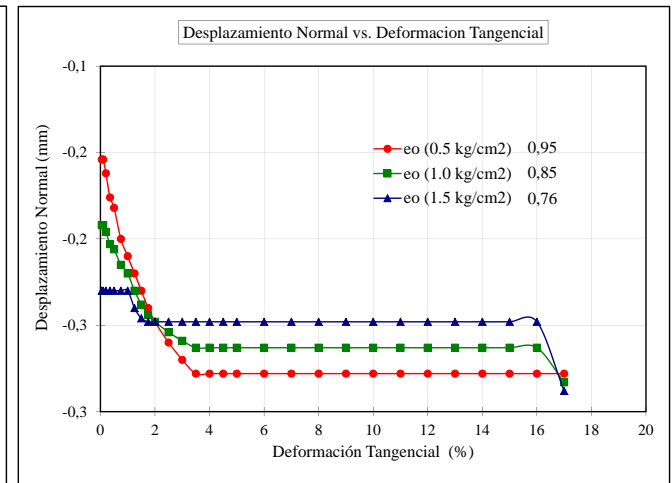
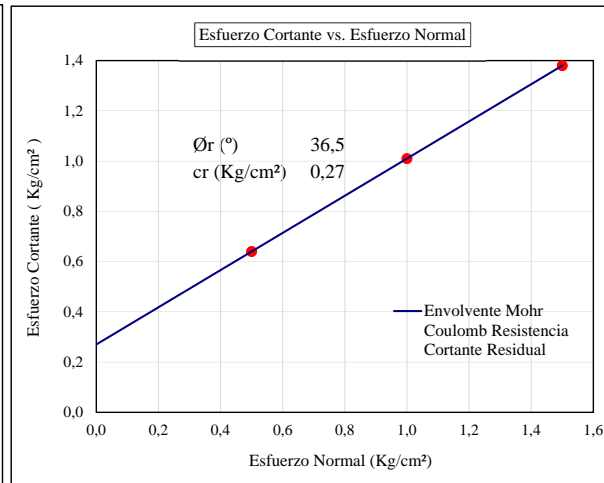
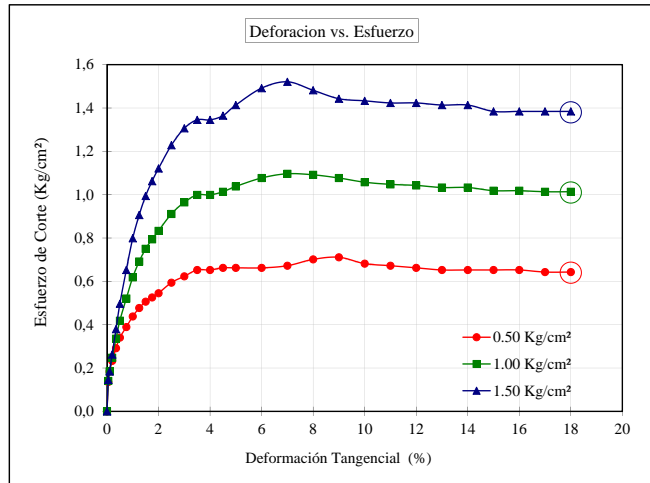
DATOS DEL ESPECIMEN		ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura (h)	(cm)	2,12	2,09	2,12	2,09	2,12	2,09
Ancho (φ)	(cm)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Densidad Total (γ _t)	(g/cm ³)	1,46	1,47	1,54	1,55	1,62	1,64
Densidad Seca (γ _d)	(g/cm ³)	1,36	1,39	1,43	1,46	1,50	1,53
Humedad (w)	(%)	7,45	5,24	7,45	6,04	7,45	6,76
Relacion de Vacios (e)		0,95	0,92	0,85	0,82	0,76	0,74
Grado de Saturación (S)	(%)	20,82	18,44	23,22	21,96	25,92	25,96
Velocidad Deformacion Tangencial	(mm/min)		0,94		0,62		0,94
Esfuerzo Normal	(Kg/cm ²)		0,50		1,00		1,50

Deform. Tangencial (%)	ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	
0,05	0,14	0,27	0,05	0,14	0,14	0,05	0,15	0,10	
0,10	0,18	0,37	0,10	0,18	0,18	0,10	0,18	0,12	
0,20	0,23	0,47	0,20	0,25	0,25	0,20	0,26	0,17	
0,35	0,29	0,58	0,35	0,34	0,34	0,35	0,38	0,25	
0,50	0,34	0,68	0,50	0,42	0,42	0,50	0,50	0,33	
0,75	0,39	0,78	0,75	0,52	0,52	0,75	0,65	0,44	
1,00	0,44	0,88	1,00	0,62	0,62	1,00	0,80	0,53	
1,25	0,48	0,95	1,25	0,69	0,69	1,25	0,91	0,60	
1,50	0,51	1,01	1,50	0,75	0,75	1,50	0,99	0,66	
1,75	0,53	1,05	1,75	0,79	0,79	1,75	1,06	0,71	
2,00	0,55	1,09	2,00	0,83	0,83	2,00	1,12	0,75	
2,50	0,59	1,19	2,50	0,91	0,91	2,50	1,23	0,82	
3,00	0,62	1,25	3,00	0,96	0,96	3,00	1,31	0,87	
3,50	0,65	1,31	3,50	1,00	1,00	3,50	1,35	0,90	
4,00	0,65	1,31	4,00	1,00	1,00	4,00	1,35	0,90	
4,50	0,66	1,32	4,50	1,01	1,01	4,50	1,36	0,91	
5,00	0,66	1,32	5,00	1,04	1,04	5,00	1,41	0,94	
6,00	0,66	1,32	6,00	1,08	1,08	6,00	1,49	0,99	
7,00	0,67	1,34	7,00	1,10	1,10	7,00	1,52	1,01	
8,00	0,70	1,40	8,00	1,09	1,09	8,00	1,48	0,99	
9,00	0,71	1,42	9,00	1,08	1,08	9,00	1,44	0,96	
10,00	0,68	1,36	10,00	1,06	1,06	10,00	1,43	0,96	
11,00	0,67	1,34	11,00	1,05	1,05	11,00	1,42	0,95	
12,00	0,66	1,32	12,00	1,04	1,04	12,00	1,42	0,95	
13,00	0,65	1,31	13,00	1,03	1,03	13,00	1,41	0,94	
14,00	0,65	1,31	14,00	1,03	1,03	14,00	1,41	0,94	
15,00	0,65	1,31	15,00	1,02	1,02	15,00	1,38	0,92	
16,00	0,65	1,31	16,00	1,02	1,02	16,00	1,38	0,92	
17,00	0,64	1,29	17,00	1,01	1,01	17,00	1,38	0,92	
18,00	0,64	1,29	18,00	1,01	1,01	18,00	1,38	0,92	
19,00			19,00			19,00			
20,00			20,00			20,00			
21,00			21,00			21,00			
22,00			22,00			22,00			
23,00			23,00			23,00			
24,00			24,00			24,00			
25,00			25,00			25,00			

OBSERVACION : La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
 El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N°	: TC-48-LG-171-2017	CANTERA	: --	TIPO DE MUESTRA	: INALTERADO
SOLICITANTE	: COSAPI S.A.	CALICATA	: C-2	CONDICION DE HUMEDAD	: NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
DIRECCIÓN	: Av República de Colombia 791, San Isidro 15046	MUESTRA	: M-2	APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL	: PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
PROYECTO	: DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT	PROFUNDIDAD	: 1,60 - 2,40	TIPO DE DEFORMACION	: DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA
UBICACIÓN	: AV. FAUCETT - AV. COLONIAL	CLASIFICACION SUCS	: ML	FECHA DE EMISION	: 31/05/2017
FECHA DE RECEPCIÓN	: 25/05/2017	FECHA DE ENSAYO	: 30/05/2017		



OBSERVACION :

La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).
Ør, cr, ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia residual, respectivamente. Øp, cp ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia máxima, respectivamente

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N° : TC-48-LG-77-2017
SOLICITANTE : COSAPI S.A.
DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046
PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT
UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL
CANTERA : --
CALICATA : C-2
MUESTRA : M-5
PROFUNDIDAD (m) : 4,70 - 5,30
CLASIFICACION (S.U.C.S.) : SM
TIPO DE MUESTRA : REMOLDEADO
CONDICION DE HUMEDAD : NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
FECHA DE RECEPCIÓN: 25/05/2017
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017
APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL : PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
TIPO DE DEFORMACION : DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA

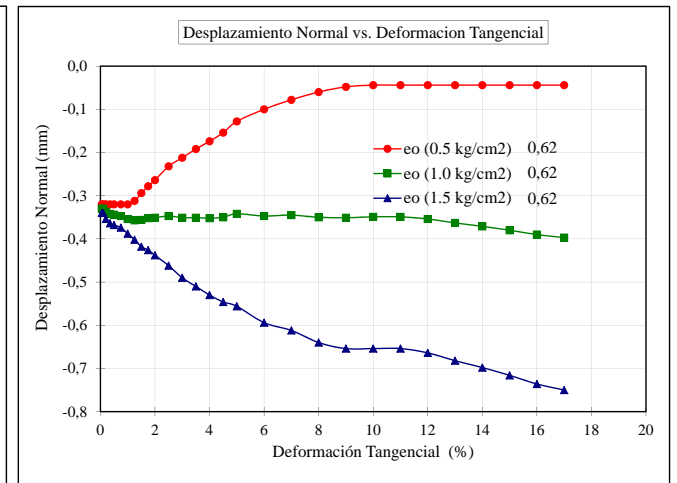
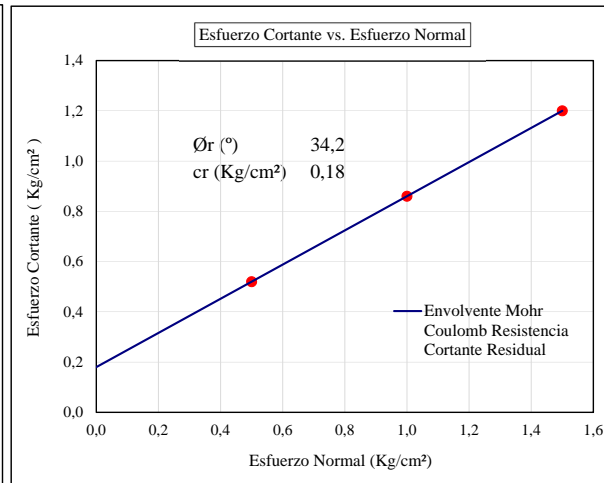
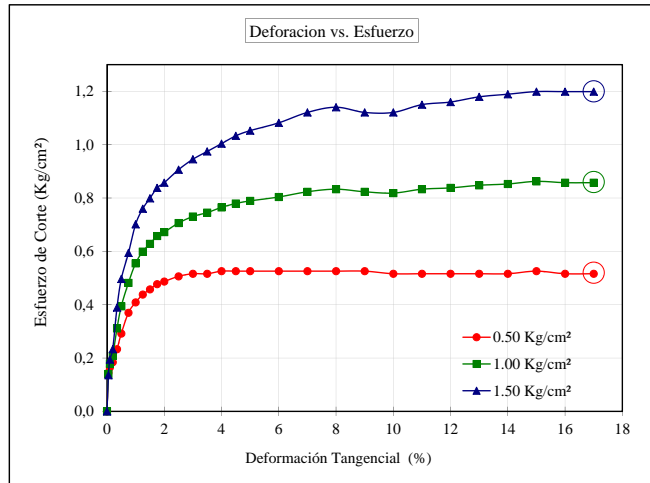
DATOS DEL ESPECIMEN	ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura (h)	(cm) 2,12	2,12	2,12	2,08	2,12	2,05
Ancho (φ)	(cm) 6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Densidad Total (γ _t)	(g/cm ³) 1,82	1,80	1,82	1,84	1,82	1,87
Densidad Seca (γ _d)	(g/cm ³) 1,64	1,62	1,64	1,65	1,64	1,68
Humedad (ω)	(%) 11,14	11,35	11,14	11,46	11,14	11,57
Relacion de Vacios (e)	0,62	0,61	0,62	0,59	0,62	0,56
Grado de Saturación (S)	(%) 47,84	42,23	47,84	45,25	47,84	48,57
Velocidad Deformacion Tangencial	(mm/min) 0,94		0,62		0,94	
Esfuerzo Normal	(Kg/cm ²) 0,50		1,00		1,50	

ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado	Deform. Tangencial (%)	Esfuerzo de Corte (Kg/cm ²)	Esfuerzo Normalizado
0,05	0,15	0,29	0,05	0,14	0,14	0,05	0,14	0,09
0,10	0,16	0,33	0,10	0,18	0,18	0,10	0,19	0,13
0,20	0,18	0,37	0,20	0,21	0,21	0,20	0,23	0,16
0,35	0,23	0,47	0,35	0,31	0,31	0,35	0,39	0,26
0,50	0,29	0,58	0,50	0,39	0,39	0,50	0,50	0,33
0,75	0,37	0,74	0,75	0,48	0,48	0,75	0,59	0,40
1,00	0,41	0,82	1,00	0,56	0,56	1,00	0,70	0,47
1,25	0,44	0,88	1,25	0,60	0,60	1,25	0,76	0,51
1,50	0,46	0,91	1,50	0,63	0,63	1,50	0,80	0,53
1,75	0,48	0,95	1,75	0,66	0,66	1,75	0,84	0,56
2,00	0,49	0,97	2,00	0,67	0,67	2,00	0,86	0,57
2,50	0,51	1,01	2,50	0,71	0,71	2,50	0,91	0,60
3,00	0,52	1,03	3,00	0,73	0,73	3,00	0,95	0,63
3,50	0,52	1,03	3,50	0,75	0,75	3,50	0,97	0,65
4,00	0,53	1,05	4,00	0,76	0,76	4,00	1,00	0,67
4,50	0,53	1,05	4,50	0,78	0,78	4,50	1,03	0,69
5,00	0,53	1,05	5,00	0,79	0,79	5,00	1,05	0,70
6,00	0,53	1,05	6,00	0,80	0,80	6,00	1,08	0,72
7,00	0,53	1,05	7,00	0,82	0,82	7,00	1,12	0,75
8,00	0,53	1,05	8,00	0,83	0,83	8,00	1,14	0,76
9,00	0,53	1,05	9,00	0,82	0,82	9,00	1,12	0,75
10,00	0,52	1,03	10,00	0,82	0,82	10,00	1,12	0,75
11,00	0,52	1,03	11,00	0,83	0,83	11,00	1,15	0,77
12,00	0,52	1,03	12,00	0,84	0,84	12,00	1,16	0,77
13,00	0,52	1,03	13,00	0,85	0,85	13,00	1,18	0,79
14,00	0,52	1,03	14,00	0,85	0,85	14,00	1,19	0,79
15,00	0,53	1,05	15,00	0,86	0,86	15,00	1,20	0,80
16,00	0,52	1,03	16,00	0,86	0,86	16,00	1,20	0,80
17,00	0,52	1,03	17,00	0,86	0,86	17,00	1,20	0,80
18,00			18,00			18,00		
19,00			19,00			19,00		
20,00			20,00			20,00		
21,00			21,00			21,00		
22,00			22,00			22,00		
23,00			23,00			23,00		
24,00			24,00			24,00		
25,00			25,00			25,00		

OBSERVACION : La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
 El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO (ASTM - D3080)
CONSOLIDADO DRENADO**

INFORME N°	: TC-48-LG-77-2017	CANTERA	: --	TIPO DE MUESTRA	: REMOLDEADO
SOLICITANTE	: COSAPI S.A.	CALICATA	: C-2	CONDICION DE HUMEDAD	: NATURAL SIN INUNDACION DE CELDA
DIRECCIÓN	: Av República de Colombia 791, San Isidro 15046	MUESTRA	: M-5	APLICACIÓN DE LA FUERZA TANGENCIAL	: PRUEBA DE DEFORMACION CONTROLADA
PROYECTO	: DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT	PROFUNDIDAD	: 4,70 - 5,30	TIPO DE DEFORMACION	: DISTORSION PRINCIPALMENTE, CON CIERTA DEFORMACION VOLUMETRICA
UBICACIÓN	: AV. FAUCETT - AV. COLONIAL	CLASIFICACION SUCS	: SM	FECHA DE EMISION	: 31/05/2017
FECHA DE RECEPCIÓN	: 25/05/2017	FECHA DE ENSAYO	: 30/05/2017		



OBSERVACION :

La muestra ha sido ensayada en estado alterado, suelto y húmeda a temperatura ambiente proporcionada e identificada por el solicitante.
El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).
Ør, cr, ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia residual, respectivamente. Øp, cp ángulo de fricción interna y cohesión de resistencia máxima, respectivamente

**DENSIDAD MAXIMA
 (ASTM D - 4253)**
INFORME : TC-048-LG-015-2017

SOLICITADO : COSAPI S.A.

PAGINA : 1/1

DIRECCION : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

REALIZADO: E.G.I.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

REVISADO : P.T.C.

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CANTERA : C-1

FECHA RECEPCION : 25/05/2016

MUESTRA : M-3

FECHA ENSAYO : 20/05/2017

PROFUNDIDAD : 2,40 - 3,35

FECHA EMISION : 31/05/2017

DESCRIPCIÓN	DETERMINACION DE LA DENSIDAD MAXIMA		
	T-1	T-1	T-1
N° del molde			
Peso del molde (g)	13458,00	13458,00	13458,00
Volumen del molde (cm³)	14233,03	14233,03	14233,03
Peso del molde + muestra (g)	46363,00	46325,00	46287,00
Densidad seca maxima (g/cm³)	2,312	2,309	2,307
Densidad seca maxima promedio (g/cm³)	2,309		

OBSERVACIONES : La muestra ensayada de 5Kg en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**DENSIDAD MAXIMA
(ASTM D - 4253)**

INFORME : TC-048-LG-013-2017

SOLICITADO : COSAPI S.A.

PAGINA : 1/1

DIRECCION : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

REALIZADO: E.G.I.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

REVISADO : P.T.C.

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CANTERA : C-1

FECHA RECEPCION : 25/05/2016

MUESTRA : M-6

FECHA ENSAYO : 20/05/2017

PROFUNDIDAD : 4,80 - 5,20

FECHA EMISION : 31/05/2017

DESCRIPCIÓN	DETERMINACION DE LA DENSIDAD MAXIMA		
	T-1	T-1	T-1
N° del molde			
Peso del molde (g)	13458,00	13458,00	13458,00
Volumen del molde (cm³)	14233,03	14233,03	14233,03
Peso del molde + muestra (g)	44049,00	44322,50	44596,00
Densidad seca maxima (g/cm³)	2,149	2,169	2,188
Densidad seca maxima promedio (g/cm³)	2,169		

OBSERVACIONES : La muestra ensayada de 5Kg en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**DENSIDAD MAXIMA
(ASTM D - 4253)**

INFORME : TC-048-LG-016-2017

SOLICITADO : COSAPI S.A.

PAGINA : 1/1

DIRECCION : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

REALIZADO: E.G.I.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

REVISADO : P.T.C.

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CANTERA : C-1

FECHA RECEPCION : 25/05/2016

MUESTRA : M-8

FECHA ENSAYO : 20/05/2017

PROFUNDIDAD : 5,50 - 6,00

FECHA EMISION : 31/05/2017

DESCRIPCIÓN	DETERMINACION DE LA DENSIDAD MAXIMA		
	T-1	T-1	T-1
N° del molde			
Peso del molde (g)	13458,00	13458,00	13458,00
Volumen del molde (cm³)	14233,03	14233,03	14233,03
Peso del molde + muestra (g)	44901,00	44907,50	44914,00
Densidad seca maxima (g/cm³)	2,209	2,210	2,210
Densidad seca maxima promedio (g/cm³)	2,210		

OBSERVACIONES :

La muestra ensayada de 5Kg en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**DENSIDAD MAXIMA
(ASTM D - 4253)**

INFORME : TC-048-LG-014-2017

SOLICITADO : COSAPI S.A. **PAGINA** : 1/1

DIRECCION : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA **REALIZADO:** E.G.I.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO **REVISADO** : P.T.C.

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CANTERA : C-2 **FECHA RECEPCION** : 25/05/2016

MUESTRA : M-3 **FECHA ENSAYO** : 20/05/2017

PROFUNDIDAD : 2,40 - 3,40 **FECHA EMISION** : 31/05/2017

DESCRIPCIÓN	DETERMINACION DE LA DENSIDAD MAXIMA		
	T-1	T-1	T-1
N° del molde			
Peso del molde (g)	13458,00	13458,00	13458,00
Volumen del molde (cm³)	14233,03	14233,03	14233,03
Peso del molde + muestra (g)	44770,00	44776,50	44783,00
Densidad seca maxima (g/cm³)	2,200	2,200	2,201
Densidad seca maxima promedio (g/cm³)	2,200		

OBSERVACIONES : La muestra ensayada de 5Kg en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

DENSIDAD MINIMA (ASTM D - 4254)
--

INFORME : TC-048-LG-015-2017

SOLICITADO : COSAPI S.A.

PAGINA : 1/1

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

REALIZADO: E.G.I.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

REVISADO : P.T.C.

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CANTERA : C-1

FECHA RECEPCION : 27/12/2016

MUESTRA : M-3

FECHA ENSAYO : 04/01/2017

PROFUNDIDAD : 2,40 - 3,35

FECHA EMISION : 05/01/2017

DESCRIPCIÓN	DETERMINACION DE LA DENSIDAD MINIMA		
	T-1	T-1	T-1
N° del molde			
Peso del molde (g)	13458,00	13458,00	13458,00
Volumen del molde (cm³)	14233,03	14233,03	14233,03
Peso del molde + muestra (g)	42201,00	42493,50	42786,00
Densidad seca maxima (g/cm³)	2,019	2,040	2,061
Densidad seca maxima promedio (g/cm³)	2,040		

OBSERVACIONES : La muestra ensayada de 5Kg en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**DENSIDAD MINIMA
(ASTM D - 4254)**

INFORME : TC-048-LG-013-2017

SOLICITADO : COSAPI S.A. **PAGINA** : 1/1

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA **REALIZADO:** E.G.I.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO **REVISADO** : P.T.C.

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CANTERA : C-1 **FECHA RECEPCION** : 27/12/2016

MUESTRA : M-6 **FECHA ENSAYO** : 04/01/2017

PROFUNDIDAD : 4,80 - 5,20 **FECHA EMISION** : 05/01/2017

DESCRIPCIÓN	DETERMINACION DE LA DENSIDAD MINIMA		
	T-1	T-1	T-1
N° del molde			
Peso del molde (g)	13458,00	13458,00	13458,00
Volumen del molde (cm³)	14233,03	14233,03	14233,03
Peso del molde + muestra (g)	37296,00	37230,50	37165,00
Densidad seca maxima (g/cm³)	1,675	1,670	1,666
Densidad seca maxima promedio (g/cm³)	1,670		

OBSERVACIONES : La muestra ensayada de 5Kg en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

DENSIDAD MINIMA
(ASTM D - 4254)

INFORME : TC-048-LG-018-2017

SOLICITADO : COSAPI S.A. **PAGINA** : 1/1

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA **REALIZADO:** E.G.I.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO **REVISADO** : P.T.C.

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CANTERA : C-1 **FECHA RECEPCION** : 27/12/2016

MUESTRA : M-8 **FECHA ENSAYO** : 04/01/2017

PROFUNDIDAD : 5,50 - 6,00 **FECHA EMISION** : 05/01/2017

DESCRIPCIÓN	DETERMINACION DE LA DENSIDAD MINIMA		
	T-1	T-1	T-1
N° del molde			
Peso del molde (g)	13458,00	13458,00	13458,00
Volumen del molde (cm³)	14233,03	14233,03	14233,03
Peso del molde + muestra (g)	39132,00	39373,50	39615,00
Densidad seca maxima (g/cm³)	1,804	1,821	1,838
Densidad seca maxima promedio (g/cm³)	1,821		

OBSERVACIONES : La muestra ensayada de 5Kg en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

DENSIDAD MINIMA
(ASTM D - 4254)

INFORME : TC-048-LG-014-2017

SOLICITADO : COSAPI S.A.

PAGINA : 1/1

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

REALIZADO: E.G.I.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

REVISADO : P.T.C.

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CANTERA : C-2

FECHA RECEPCION : 27/12/2016

MUESTRA : M-3

FECHA ENSAYO : 04/01/2017

PROFUNDIDAD : 2,40 - 3,40

FECHA EMISION : 05/01/2017

DESCRIPCIÓN	DETERMINACION DE LA DENSIDAD MINIMA		
	T-1	T-1	T-1
N° del molde			
Peso del molde (g)	13458,00	13458,00	13458,00
Volumen del molde (cm³)	14233,03	14233,03	14233,03
Peso del molde + muestra (g)	40321,00	40130,00	39939,00
Densidad seca maxima (g/cm³)	1,887	1,874	1,861
Densidad seca maxima promedio (g/cm³)	1,874		

OBSERVACIONES : La muestra ensayada de 5Kg en estado alterado, suelto y humeda a temperatura ambiente ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYO ESFUERZO DEFORMACION EN EDOMETRO

INFORME : TC-048-LG-100-2016 **Página** : 1/1
SOLICITANTE : COSAPI S.A. **Realizado:** E.G.I.
DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA **Revisado** : P.T.C.
PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO
UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

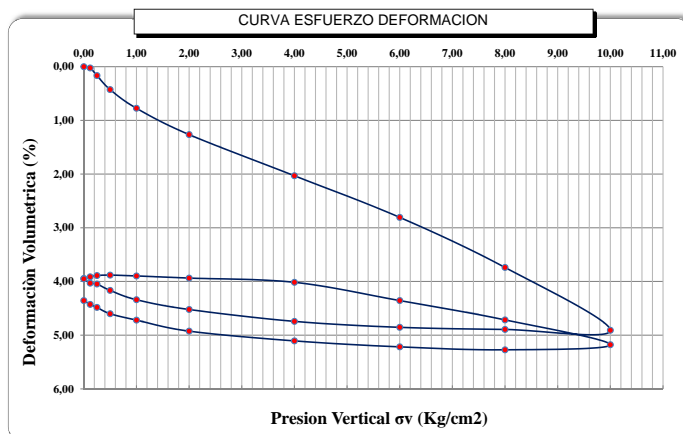
Identificación de la muestra inalterada	
Sondeo	C-1
Muestra	M-1
Profundidad (m)	0,85 - 1,85

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Peso del Anillo (gr)	215,90
Peso del Anillo + Muestra (gr)	253,30
Altura (cm)	2,53
Diametro (cm)	6,35
Volumen Inicial (cm ³)	80,12

	Humedad
Peso de la Tara (gr)	25,30
Peso de la Tara + Muestra Humeda (gr)	229,90
Peso de la Tara + Muestra Seca (gr)	209,70
Humedad Natural (%)	11,0%

PRESION VERTICAL (Kg/cm ²)	LECTURA DE DEFORMACION H (mm)	ΔH (mm)	ΔV (cm ³)	ΔV/V (%)
0,00	10,650	0,00	0,00	0,00
0,12	10,644	0,01	0,02	0,02
0,25	10,608	0,04	0,13	0,17
0,50	10,542	0,11	0,34	0,43
1,00	10,454	0,20	0,62	0,77
2,00	10,330	0,32	1,01	1,26
4,00	10,136	0,51	1,63	2,03
6,00	9,940	0,71	2,25	2,81
8,00	9,704	0,95	3,00	3,74
10,00	9,408	1,24	3,93	4,91
8,00	9,412	1,24	3,92	4,89
6,00	9,422	1,23	3,89	4,85
4,00	9,450	1,20	3,80	4,74
2,00	9,506	1,14	3,62	4,52
1,00	9,552	1,10	3,48	4,34
0,50	9,596	1,05	3,34	4,17
0,25	9,626	1,02	3,24	4,05
0,12	9,630	1,02	3,23	4,03
0,00	9,652	1,00	3,16	3,94
0,00	9,650	1,00	3,17	3,95
0,12	9,660	0,99	3,14	3,91
0,25	9,666	0,98	3,12	3,89
0,50	9,668	0,98	3,11	3,88
1,00	9,664	0,99	3,12	3,90
2,00	9,654	1,00	3,15	3,94
4,00	9,634	1,02	3,22	4,02
6,00	9,548	1,10	3,49	4,36
8,00	9,457	1,19	3,78	4,72
10,00	9,340	1,31	4,15	5,18
8,00	9,316	1,33	4,22	5,27
6,00	9,330	1,32	4,18	5,22
4,00	9,358	1,29	4,09	5,11
2,00	9,404	1,25	3,95	4,92
1,00	9,456	1,19	3,78	4,72
0,50	9,486	1,16	3,69	4,60
0,25	9,516	1,13	3,59	4,48
0,12	9,530	1,12	3,55	4,43
0,00	9,548	1,10	3,49	4,36



OBSERVACION : El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO VALIDO UNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA, NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

ENSAYO ESFUERZO DEFORMACION EN EDOMETRO

INFORME : TC-048-LG-101-2016

Página : 1/1

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

Identificación de la muestra inalterada	
Sondeo	C-1
Muestra	M-2
Profundidad (m)	1,85 - 2,20

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

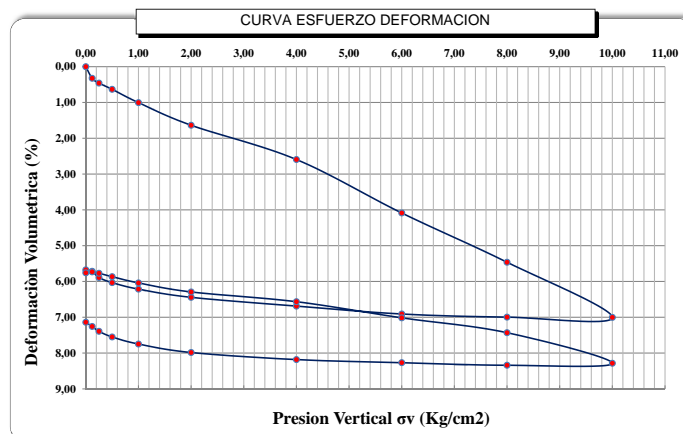
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Peso del Anillo (gr)	215,90
Peso del Anillo + Muestra (gr)	257,60
Altura (cm)	2,53
Diametro (cm)	6,35
Volumen Inicial (cm ³)	80,12

	Humedad
Peso de la Tara (gr)	23,30
Peso de la Tara + Muestra Humeda (gr)	170,70
Peso de la Tara + Muestra Seca (gr)	154,40
Humedad Natural (%)	12,4%

PRESION VERTICAL (Kg/cm ²)	LECTURA DE DEFORMACION H (mm)	ΔH (mm)	AV (cm ³)	AV/V (%)
0,00	9,346	0,00	0,00	0,00
0,12	9,264	0,08	0,26	0,32
0,25	9,230	0,12	0,37	0,46
0,50	9,186	0,16	0,51	0,63
1,00	9,092	0,25	0,80	1,00
2,00	8,932	0,41	1,31	1,64
4,00	8,690	0,66	2,08	2,59
6,00	8,312	1,03	3,27	4,09
8,00	7,964	1,38	4,38	5,46
10,00	7,574	1,77	5,61	7,00
8,00	7,576	1,77	5,61	7,00
6,00	7,598	1,75	5,54	6,91
4,00	7,654	1,69	5,36	6,69
2,00	7,716	1,63	5,16	6,44
1,00	7,774	1,57	4,98	6,21
0,50	7,820	1,53	4,83	6,03
0,25	7,856	1,49	4,72	5,89
0,12	7,900	1,45	4,58	5,72
0,00	7,910	1,44	4,55	5,68
0,00	7,889	1,46	4,61	5,76
0,12	7,896	1,45	4,59	5,73
0,25	7,886	1,46	4,62	5,77
0,50	7,862	1,48	4,70	5,87
1,00	7,818	1,53	4,84	6,04
2,00	7,754	1,59	5,04	6,29
4,00	7,685	1,66	5,26	6,57
6,00	7,571	1,78	5,62	7,02
8,00	7,466	1,88	5,95	7,43
10,00	7,250	2,10	6,64	8,28
8,00	7,236	2,11	6,68	8,34
6,00	7,254	2,09	6,63	8,27
4,00	7,276	2,07	6,56	8,18
2,00	7,326	2,02	6,40	7,98
1,00	7,386	1,96	6,21	7,75
0,50	7,436	1,91	6,05	7,55
0,25	7,476	1,87	5,92	7,39
0,12	7,510	1,84	5,81	7,26
0,00	7,540	1,81	5,72	7,14



OBSERVACION : El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO VALIDO UNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA, NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

ENSAYO ESFUERZO DEFORMACION EN EDOMETRO

INFORME : TC-048-LG-100-2016

Página : 1/1

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

Identificación de la muestra inalterada	
Sondeo	C-1/M-1
Muestra	M-8
Profundidad (m)	5,50 - 6,00

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

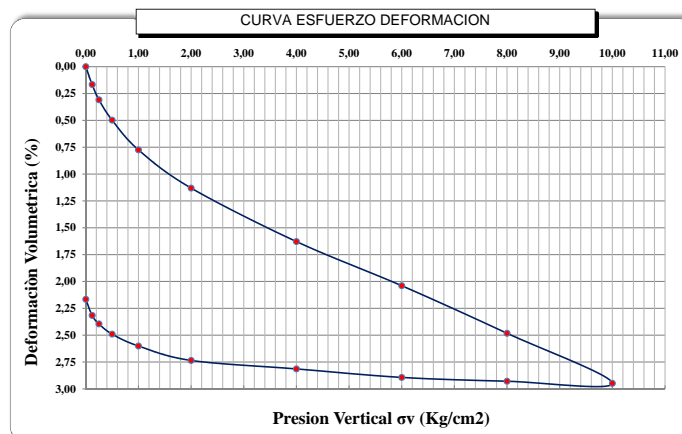
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Peso del Anillo (gr)	215,90
Peso del Anillo + Muestra (gr)	253,30
Altura (cm)	2,53
Diametro (cm)	6,35
Volumen Inicial (cm ³)	80,12

	Humedad
Peso de la Tara (gr)	22,50
Peso de la Tara + Muestra Humeda (gr)	175,00
Peso de la Tara + Muestra Seca (gr)	169,30
Humedad Natural (%)	3,9%

PRESION VERTICAL (Kg/cm ²)	LECTURA DE DEFORMACION H (mm)	ΔH (mm)	AV (cm ³)	AV/V (%)
0,00	8,260	0,00	0,00	0,00
0,12	8,218	0,04	0,13	0,17
0,25	8,182	0,08	0,25	0,31
0,50	8,134	0,13	0,40	0,50
1,00	8,064	0,20	0,62	0,77
2,00	7,974	0,29	0,91	1,13
4,00	7,848	0,41	1,30	1,63
6,00	7,744	0,52	1,63	2,04
8,00	7,632	0,63	1,99	2,48
10,00	7,514	0,75	2,36	2,95
8,00	7,519	0,74	2,35	2,93
6,00	7,528	0,73	2,32	2,89
4,00	7,548	0,71	2,25	2,81
2,00	7,568	0,69	2,19	2,74
1,00	7,602	0,66	2,08	2,60
0,50	7,630	0,63	2,00	2,49
0,25	7,654	0,61	1,92	2,40
0,12	7,674	0,59	1,86	2,32
0,00	7,712	0,55	1,74	2,17
0,00	9,650	-1,39	-4,40	-5,49
0,12	9,660	-1,40	-4,43	-5,53
0,25	9,666	-1,41	-4,45	-5,56
0,50	9,668	-1,41	-4,46	-5,57
1,00	9,664	-1,40	-4,45	-5,55
2,00	9,654	-1,39	-4,41	-5,51
4,00	9,634	-1,37	-4,35	-5,43
6,00	9,548	-1,29	-4,08	-5,09
8,00	9,457	-1,20	-3,79	-4,73
10,00	9,340	-1,08	-3,42	-4,27
8,00	9,316	-1,06	-3,34	-4,17
6,00	9,330	-1,07	-3,39	-4,23
4,00	9,358	-1,10	-3,48	-4,34
2,00	9,404	-1,14	-3,62	-4,52
1,00	9,456	-1,20	-3,79	-4,73
0,50	9,486	-1,23	-3,88	-4,85
0,25	9,516	-1,26	-3,98	-4,96
0,12	9,530	-1,27	-4,02	-5,02
0,00	9,548	-1,29	-4,08	-5,09



OBSERVACION : El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO VALIDO UNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA, NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

ENSAYO ESFUERZO DEFORMACION EN EDOMETRO

INFORME : TC-048-LG-103-2016

Página : 1/1

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

Identificación de la muestra inalterada	
Sondeo	C-2
Muestra	M-1
Profundidad (m)	0,60 - 1,60

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

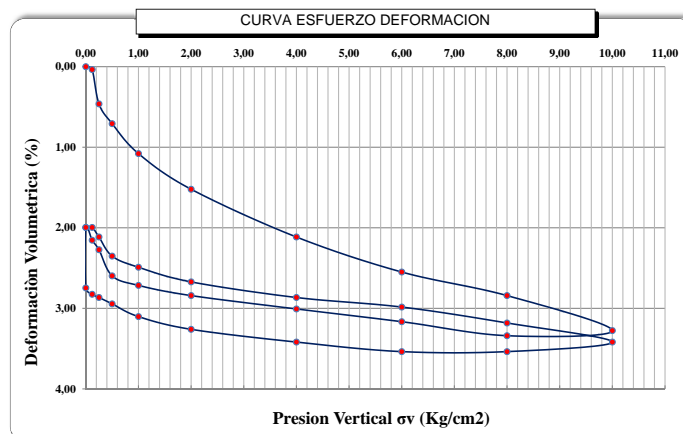
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Peso del Anillo (gr)	215,90
Peso del Anillo + Muestra (gr)	259,90
Altura (cm)	2,53
Diametro (cm)	6,35
Volumen Inicial (cm ³)	80,12

	Humedad
Peso de la Tara (gr)	25,30
Peso de la Tara + Muestra Humeda (gr)	229,90
Peso de la Tara + Muestra Seca (gr)	209,70
Humedad Natural (%)	11,0%

PRESION VERTICAL (Kg/cm ²)	LECTURA DE DEFORMACION H (mm)	ΔH (mm)	AV (cm ³)	AV/V (%)
0,00	9,045	0,00	0,00	0,00
0,12	9,036	0,01	0,03	0,04
0,25	8,928	0,12	0,37	0,46
0,50	8,866	0,18	0,57	0,71
1,00	8,772	0,27	0,86	1,08
2,00	8,660	0,39	1,22	1,52
4,00	8,510	0,54	1,69	2,11
6,00	8,400	0,65	2,04	2,55
8,00	8,326	0,72	2,28	2,84
10,00	8,216	0,83	2,63	3,28
8,00	8,200	0,85	2,68	3,34
6,00	8,244	0,80	2,54	3,17
4,00	8,284	0,76	2,41	3,01
2,00	8,326	0,72	2,28	2,84
1,00	8,358	0,69	2,18	2,72
0,50	8,388	0,66	2,08	2,60
0,25	8,470	0,57	1,82	2,27
0,12	8,500	0,55	1,73	2,15
0,00	8,540	0,51	1,60	2,00
0,00	8,350	0,70	2,20	2,75
0,12	8,330	0,72	2,26	2,83
0,25	8,320	0,73	2,30	2,87
0,50	8,300	0,74	2,36	2,94
1,00	8,260	0,79	2,49	3,10
2,00	8,220	0,82	2,61	3,26
4,00	8,180	0,87	2,74	3,42
6,00	8,150	0,90	2,83	3,54
8,00	8,150	0,90	2,83	3,54
10,00	8,180	0,87	2,74	3,42
8,00	8,240	0,81	2,55	3,18
6,00	8,290	0,76	2,39	2,98
4,00	8,320	0,73	2,30	2,87
2,00	8,369	0,68	2,14	2,67
1,00	8,415	0,63	2,00	2,49
0,50	8,450	0,60	1,88	2,35
0,25	8,510	0,54	1,69	2,11
0,12	8,540	0,51	1,60	2,00
0,00	8,540	0,51	1,60	2,00



OBSERVACION : El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO VALIDO UNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA, NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

ENSAYO ESFUERZO DEFORMACION EN EDOMETRO

INFORME : TC-048-LG-104-2016 Pagina : 1/1
 SOLICITANTE : COSAPI S.A. Realizado: E.G.I.
 DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA Revisado : P.T.C.
 PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO
 UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

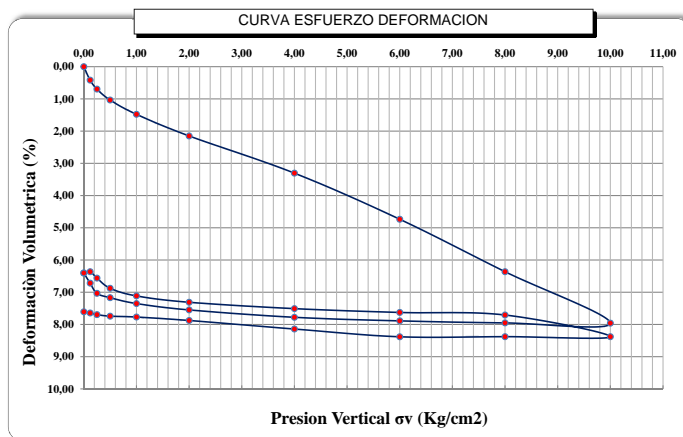
Identificación de la muestra inalterada	
Sondeo	C-2
Muestra	M-2
Profundidad (m)	1,60 - 2,40

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017
 FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
 FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Peso del Anillo (gr)	215,90
Peso del Anillo + Muestra (gr)	248,30
Altura (cm)	2,53
Diametro (cm)	6,35
Volumen Inicial (cm ³)	80,12

	Humedad
Peso de la Tara (gr)	22,50
Peso de la Tara + Muestra Humeda (gr)	153,00
Peso de la Tara + Muestra Seca (gr)	141,80
Humedad Natural (%)	9,4%

PRESION VERTICAL (Kg/cm ²)	LECTURA DE DEFORMACION H (mm)	ΔH (mm)	AV (cm ³)	AV/V (%)
0,00	10,220	0,00	0,00	0,00
0,12	10,114	0,11	0,34	0,42
0,25	10,044	0,18	0,56	0,70
0,50	9,958	0,26	0,83	1,04
1,00	9,846	0,37	1,18	1,48
2,00	9,676	0,54	1,72	2,15
4,00	9,384	0,84	2,65	3,30
6,00	9,022	1,20	3,79	4,74
8,00	8,610	1,61	5,10	6,36
10,00	8,206	2,01	6,38	7,96
8,00	8,208	2,01	6,37	7,95
6,00	8,224	2,00	6,32	7,89
4,00	8,252	1,97	6,23	7,78
2,00	8,310	1,91	6,05	7,55
1,00	8,360	1,86	5,89	7,35
0,50	8,406	1,81	5,74	7,17
0,25	8,440	1,78	5,64	7,04
0,12	8,520	1,70	5,38	6,72
0,00	8,600	1,62	5,13	6,40
0,00	8,600	1,62	5,13	6,40
0,12	8,610	1,61	5,10	6,36
0,25	8,560	1,66	5,26	6,56
0,50	8,480	1,74	5,51	6,88
1,00	8,420	1,80	5,70	7,11
2,00	8,370	1,85	5,86	7,31
4,00	8,320	1,90	6,02	7,51
6,00	8,290	1,93	6,11	7,63
8,00	8,270	1,95	6,18	7,71
10,00	8,100	2,12	6,71	8,38
8,00	8,100	2,12	6,71	8,38
6,00	8,099	2,12	6,72	8,38
4,00	8,160	2,06	6,52	8,14
2,00	8,227	1,99	6,31	7,88
1,00	8,254	1,97	6,23	7,77
0,50	8,261	1,96	6,20	7,74
0,25	8,273	1,95	6,17	7,70
0,12	8,286	1,93	6,12	7,64
0,00	8,295	1,93	6,10	7,61



OBSERVACION : El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO VALIDO UNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA, NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

ENSAYO ESFUERZO DEFORMACION EN EDOMETRO

INFORME : TC-048-LG-100-2016 Pagina : 1/1
 SOLICITANTE : COSAPI S.A. Realizado: E.G.I.
 DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA Revisado : P.T.C.
 PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO
 UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

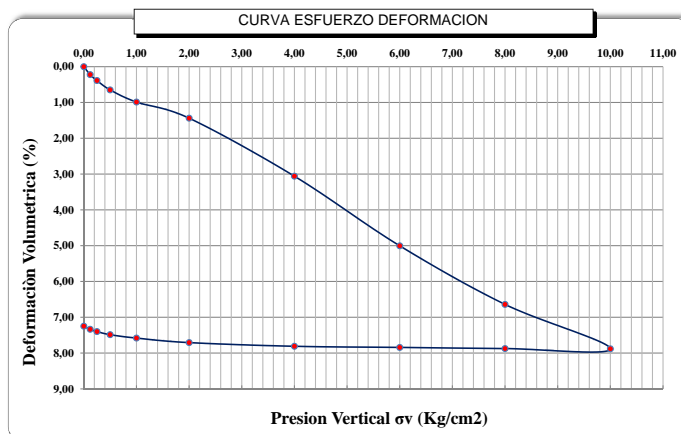
Identificación de la muestra inalterada	
Sondeo	C-2/M-3
Muestra	M-3
Profundidad (m)	2,40 - 3,40

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017
 FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
 FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Peso del Anillo (gr)	215,90
Peso del Anillo + Muestra (gr)	253,30
Altura (cm)	2,53
Diametro (cm)	6,35
Volumen Inicial (cm ³)	80,12

	Humedad
Peso de la Tara (gr)	23,60
Peso de la Tara + Muestra Humeda (gr)	209,90
Peso de la Tara + Muestra Seca (gr)	201,50
Humedad Natural (%)	4,7%

PRESION VERTICAL (Kg/cm ²)	LECTURA DE DEFORMACION H (mm)	ΔH (mm)	ΔV (cm ³)	ΔV/V (%)
0,00	9,342	0,00	0,00	0,00
0,12	9,286	0,06	0,18	0,22
0,25	9,244	0,10	0,31	0,39
0,50	9,178	0,16	0,52	0,65
1,00	9,092	0,25	0,79	0,99
2,00	8,978	0,36	1,15	1,44
4,00	8,568	0,77	2,45	3,06
6,00	8,076	1,27	4,01	5,00
8,00	7,662	1,68	5,32	6,64
10,00	7,348	1,99	6,31	7,88
8,00	7,350	1,99	6,31	7,87
6,00	7,358	1,98	6,28	7,84
4,00	7,366	1,98	6,26	7,81
2,00	7,392	1,95	6,18	7,71
1,00	7,424	1,92	6,07	7,58
0,50	7,448	1,89	6,00	7,49
0,25	7,470	1,87	5,93	7,40
0,12	7,486	1,86	5,88	7,34
0,00	7,508	1,83	5,81	7,25
0,00	9,650	-0,31	-0,98	-1,22
0,12	9,660	-0,32	-1,01	-1,26
0,25	9,666	-0,32	-1,03	-1,28
0,50	9,668	-0,33	-1,03	-1,29
1,00	9,664	-0,32	-1,02	-1,27
2,00	9,654	-0,31	-0,99	-1,23
4,00	9,634	-0,29	-0,92	-1,15
6,00	9,548	-0,21	-0,65	-0,81
8,00	9,457	-0,12	-0,36	-0,45
10,00	9,340	0,00	0,01	0,01
8,00	9,316	0,03	0,08	0,10
6,00	9,330	0,01	0,04	0,05
4,00	9,358	-0,02	-0,05	-0,06
2,00	9,404	-0,06	-0,20	-0,25
1,00	9,456	-0,11	-0,36	-0,45
0,50	9,486	-0,14	-0,46	-0,57
0,25	9,516	-0,17	-0,55	-0,69
0,12	9,530	-0,19	-0,60	-0,74
0,00	9,548	-0,21	-0,65	-0,81



OBSERVACION : El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO VALIDO UNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA, NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

ENSAYO ESFUERZO DEFORMACION EN EDOMETRO

INFORME : TC-048-LG-105-2016 **Página** : 1/1

SOLICITANTE : COSAPI S.A. **Realizado:** E.G.I.

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA **Revisado** : P.T.C.

PROYECTO : DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DEL DISEÑO DE TUNEL LINER DE LA ESTACION E-5 CORRESPONDIENTES A LA ETAPA 2 DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

UBICACIÓN : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

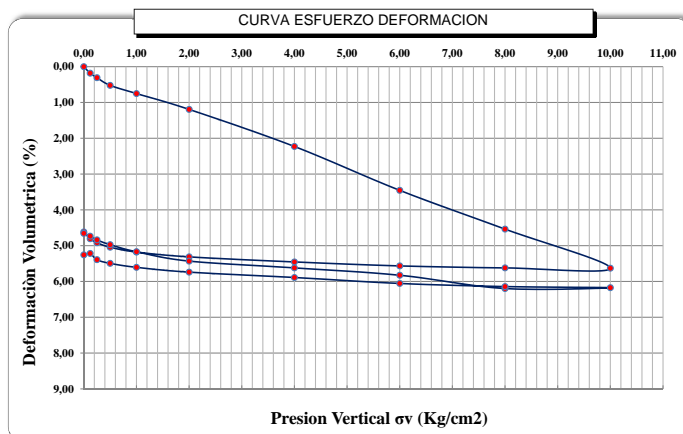
Identificación de la muestra inalterada	
Sondeo	C-2
Muestra	M-4
Profundidad (m)	3,40 - 4,70

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017
FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017
FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Peso del Anillo (gr)	215,90
Peso del Anillo + Muestra (gr)	257,60
Altura (cm)	2,53
Diametro (cm)	6,35
Volumen Inicial (cm ³)	80,12

	Humedad
Peso de la Tara (gr)	25,30
Peso de la Tara + Muestra Humeda (gr)	174,80
Peso de la Tara + Muestra Seca (gr)	166,20
Humedad Natural (%)	6,1%

PRESION VERTICAL (Kg/cm ²)	LECTURA DE DEFORMACION H (mm)	ΔH (mm)	ΔV (cm ³)	ΔV/V (%)
0,00	9,750	0,00	0,00	0,00
0,12	9,704	0,05	0,15	0,18
0,25	9,672	0,08	0,25	0,31
0,50	9,618	0,13	0,42	0,52
1,00	9,560	0,19	0,60	0,75
2,00	9,448	0,30	0,96	1,19
4,00	9,186	0,56	1,79	2,23
6,00	8,876	0,87	2,77	3,45
8,00	8,602	1,15	3,64	4,54
10,00	8,326	1,42	4,51	5,63
8,00	8,328	1,42	4,50	5,62
6,00	8,342	1,41	4,46	5,57
4,00	8,370	1,38	4,37	5,45
2,00	8,406	1,34	4,26	5,31
1,00	8,440	1,31	4,15	5,18
0,50	8,474	1,28	4,04	5,04
0,25	8,506	1,24	3,94	4,92
0,12	8,534	1,22	3,85	4,81
0,00	8,582	1,17	3,70	4,62
0,00	8,572	1,18	3,73	4,66
0,12	8,552	1,20	3,79	4,74
0,25	8,526	1,22	3,88	4,84
0,50	8,492	1,26	3,98	4,97
1,00	8,442	1,31	4,14	5,17
2,00	8,376	1,37	4,35	5,43
4,00	8,328	1,42	4,50	5,62
6,00	8,276	1,47	4,67	5,83
8,00	8,182	1,57	4,97	6,20
10,00	8,188	1,56	4,95	6,17
8,00	8,196	1,55	4,92	6,14
6,00	8,218	1,53	4,85	6,06
4,00	8,260	1,49	4,72	5,89
2,00	8,298	1,45	4,60	5,74
1,00	8,332	1,42	4,49	5,60
0,50	8,360	1,39	4,40	5,49
0,25	8,386	1,36	4,32	5,39
0,12	8,430	1,32	4,18	5,22
0,00	8,420	1,33	4,21	5,26



OBSERVACION : El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO VALIDO UNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA, NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-212-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-1
Muestra :	M-1
Profundidad (m) :	0,85 - 1,85

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	100,00
		3/4"	19,000	100,00
		3/8"	9,500	99,69
		N° 004	4,750	99,69
		N° 010	2,000	99,52
		N° 020	0,850	98,88
		N° 040	0,425	95,17
		N° 060	0,250	87,82
		N° 100	0,150	76,91
		N° 200	0,075	63,66

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	ML
Descripción :	LIMO ARENOSO

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-4 (0)
Descripción (AASHTO)	POB - MALO

Norma ASTM D 2216

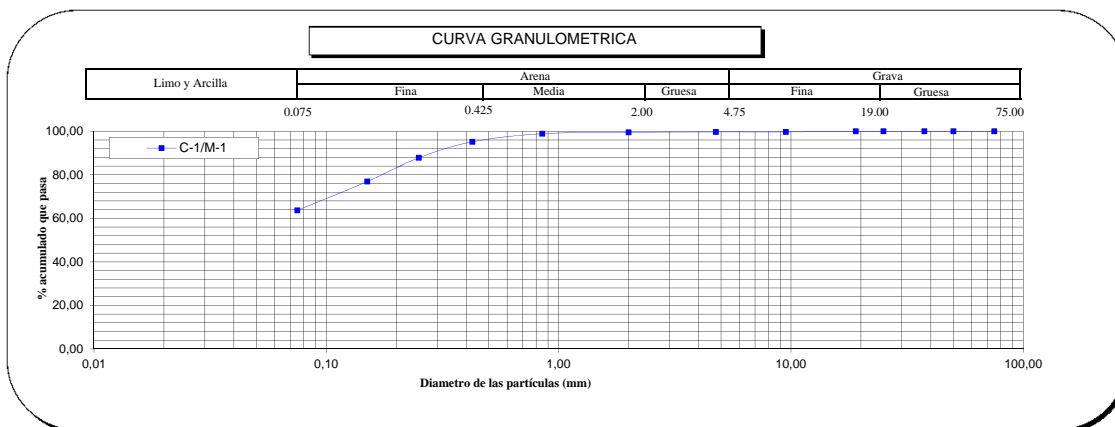
Contenido de Humedad (%)	11
--------------------------	----

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	20
Límite Plástico (LP)	17
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	3

% GRAVA	0,31	Gruesa	0,00
		Fina	0,31
% ARENA	36,03	Gruesa	0,17
		Media	4,35
		Fina	31,51
% FINOS	63,66		63,66

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	NP
D ₆₀ (mm)	NP
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEC 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-210-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-1
Muestra :	M-2
Profundidad (m) :	1,85 - 2,20

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	100,00
		3/4"	19,000	100,00
		3/8"	9,500	100,00
		N° 004	4,750	100,00
		N° 010	2,000	99,95
		N° 020	0,850	99,67
		N° 040	0,425	98,63
		N° 060	0,250	97,37
		N° 100	0,150	92,76
		N° 200	0,075	83,71

% GRAVA	0,00	Gruesa	0,00
		Fina	0,00
% ARENA	16,29	Gruesa	0,05
		Media	1,32
		Fina	14,92
% FINOS	83,71		83,71

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	ML
Descripción :	LIMO ARENOSO

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-4 (1)
Descripción (AASHTO)	POB - MALO

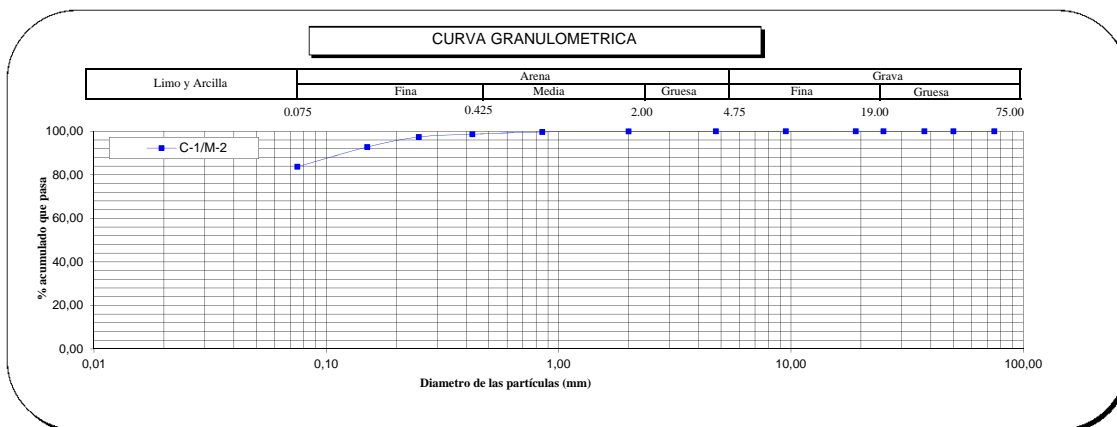
Norma ASTM D 2216

Contenido de Humedad (%)	14
--------------------------	----

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	23
Límite Plástico (LP)	19
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	3

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	NP
D ₆₀ (mm)	NP
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-202-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-1
Muestra :	M-3
Profundidad (m) :	2,40 - 3,35

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	86,40
		2"	50,000	64,65
		1 1/2"	37,500	55,91
		1"	25,000	40,82
		3/4"	19,000	34,30
		3/8"	9,500	30,33
		N° 004	4,750	29,22
		N° 010	2,000	28,15
		N° 020	0,850	26,38
		N° 040	0,425	22,28
		N° 060	0,250	18,42
		N° 100	0,150	16,00
		N° 200	0,075	14,47

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	GM
Descripción :	GRAVA LIMOSA

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-1-a (0)
Descripción (AASHTO)	EXC - BUENO

Norma ASTM D 2216

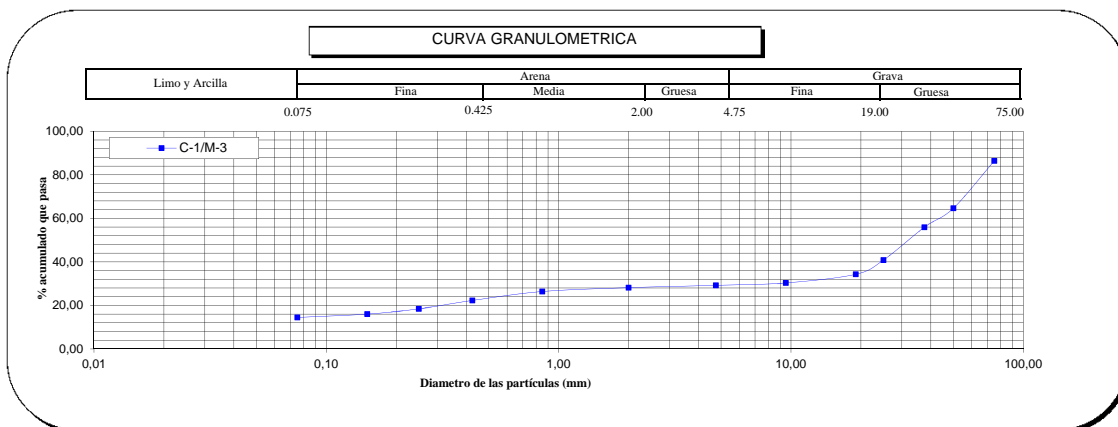
Contenido de Humedad (%)	1
----------------------------	---

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

% GRAVA	70,78	Gruesa	65,70
		Fina	5,08
		Gruesa	1,07
% ARENA	14,75	Media	5,87
		Fina	7,81
% FINOS	14,47		14,47

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	8,09
D ₆₀ (mm)	43,35
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-206-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-1
Muestra :	M-4
Profundidad (m) :	3,35 - 4,00

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	100,00
		3/4"	19,000	97,75
		3/8"	9,500	97,08
		N° 004	4,750	97,08
		N° 010	2,000	96,10
		N° 020	0,850	92,16
		N° 040	0,425	62,44
		N° 060	0,250	32,17
		N° 100	0,150	11,70
		N° 200	0,075	4,31

% GRAVA	2,92	Gruesa	2,25
		Fina	0,66
% ARENA	92,77	Gruesa	0,98
		Media	33,66
		Fina	58,12
% FINOS	4,31		4,31

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	SP
Descripción :	ARENA MAL GRADUADA

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-3 (1)
Descripción (AASHTO)	EXC - BUENO

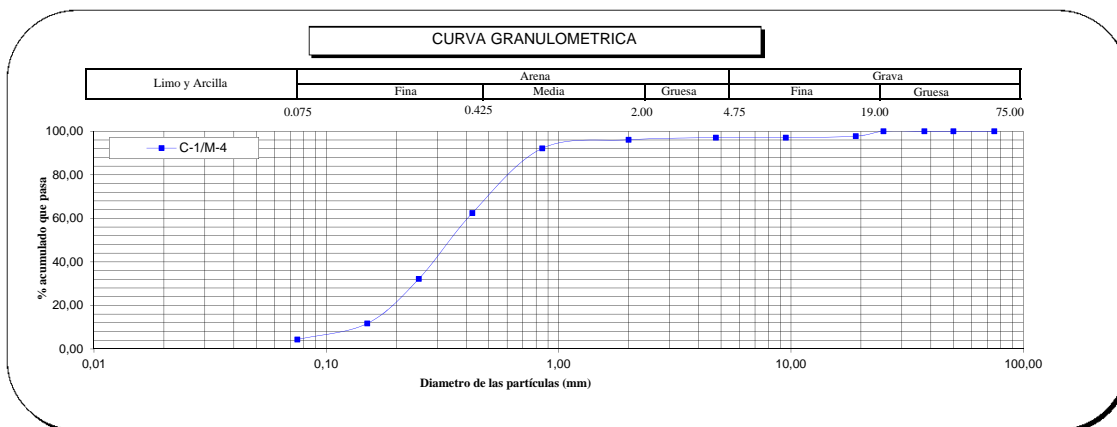
Norma ASTM D 2216

Contenido de Humedad (%)	4
--------------------------	---

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

D ₁₀ (mm)	0,13
D ₃₀ (mm)	0,24
D ₆₀ (mm)	0,41
Cu	3,10
Cc	1,05



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-208-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-1
Muestra :	M-5
Profundidad (m) :	4,00 - 4,80

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	95,49
		3/4"	19,000	95,49
		3/8"	9,500	95,49
		N° 004	4,750	95,49
		N° 010	2,000	95,44
		N° 020	0,850	95,14
		N° 040	0,425	89,30
		N° 060	0,250	71,61
		N° 100	0,150	57,36
		N° 200	0,075	45,28

% GRAVA	4,51	Gruesa	4,51
		Fina	0,00
% ARENA	50,21	Gruesa	0,05
		Media	6,14
		Fina	44,02
% FINOS	45,28		45,28

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	SM
Descripción :	ARENA LIMOSA

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-4 (0)
Descripción (AASHTO)	POB - MALO

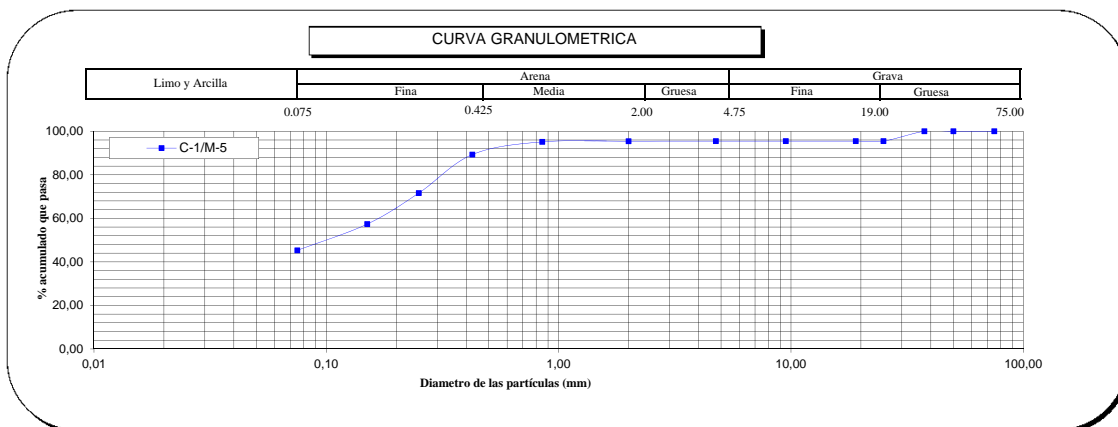
Norma ASTM D 2216

Contenido de Humedad (%)	15
--------------------------	----

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	NP
D ₆₀ (mm)	0,17
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-200-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-1
Muestra :	M-6
Profundidad (m) :	4,80 - 5,20

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	83,59
		1 1/2"	37,500	61,06
		1"	25,000	52,94
		3/4"	19,000	47,67
		3/8"	9,500	41,22
		N° 004	4,750	40,79
		N° 010	2,000	40,65
		N° 020	0,850	40,06
		N° 040	0,425	36,53
		N° 060	0,250	29,74
		N° 100	0,150	22,49
		N° 200	0,075	17,38

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	GM
Descripción :	GRAVA LIMOSA CON ARENA

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-1-b (0)
Descripción (AASHTO)	EXC - BUENO

Norma ASTM D 2216

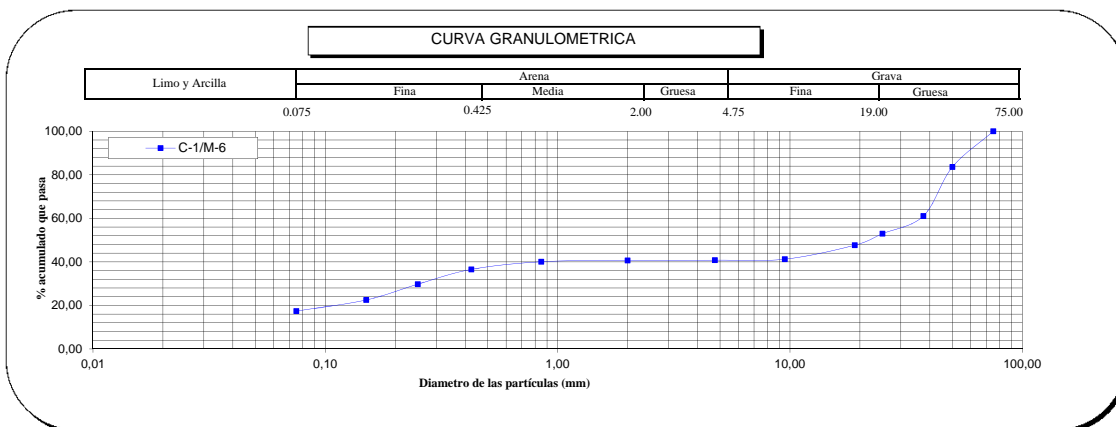
Contenido de Humedad (%)	7
--------------------------	---

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

% GRAVA	59,21	Gruesa	52,33
		Fina	6,88
% ARENA	23,41	Gruesa	0,14
		Media	4,12
		Fina	19,15
% FINOS	17,38		17,38

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	0,26
D ₆₀ (mm)	35,87
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-207-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-1
Muestra :	M-7
Profundidad (m) :	5,20 - 5,50

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	96,70
		3/4"	19,000	92,60
		3/8"	9,500	87,74
		N° 004	4,750	87,74
		N° 010	2,000	85,29
		N° 020	0,850	84,22
		N° 040	0,425	73,56
		N° 060	0,250	35,26
		N° 100	0,150	16,06
		N° 200	0,075	6,64

% GRAVA	12,26	Gruesa	7,40
		Fina	4,86
% ARENA	81,10	Gruesa	2,45
		Media	11,73
		Fina	66,91
% FINOS	6,64		6,64

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	SP-SM
Descripción :	ARENA MAL GRADUADA CON LIMO

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-3 (1)
Descripción (AASHTO)	EXC - BUENO

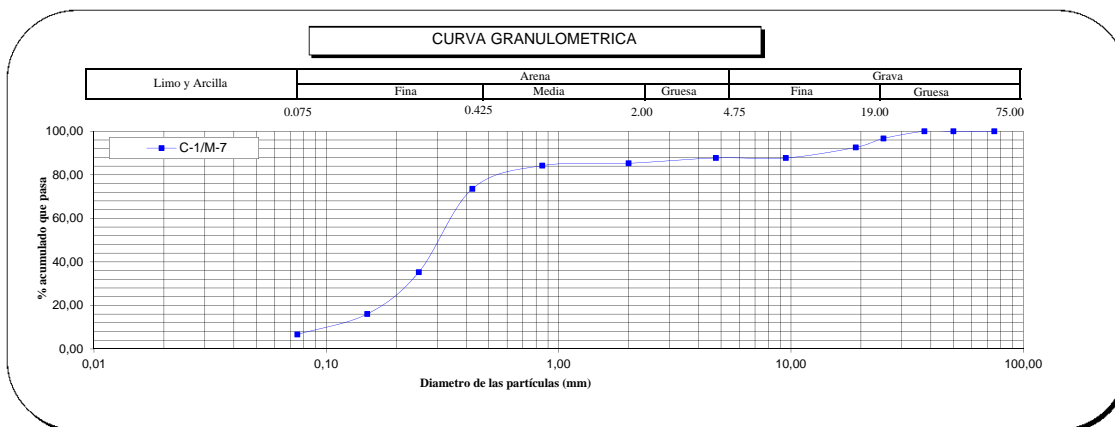
Norma ASTM D 2216

Contenido de Humedad (%)	5
----------------------------	---

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

D ₁₀ (mm)	0,10
D ₃₀ (mm)	0,22
D ₆₀ (mm)	0,36
Cu	3,57
Cc	1,34



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-201-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-1
Muestra :	M-8
Profundidad (m) :	5,50 - 6,00

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	88,37
		1 1/2"	37,500	59,95
		1"	25,000	46,76
		3/4"	19,000	39,85
		3/8"	9,500	27,01
		Nº 004	4,750	24,43
		Nº 010	2,000	23,15
		Nº 020	0,850	21,75
		Nº 040	0,425	15,77
		Nº 060	0,250	8,03
		Nº 100	0,150	4,31
		Nº 200	0,075	2,72

% GRAVA	75,57	Gruesa	60,15
		Fina	15,42
% ARENA	21,71	Gruesa	1,28
		Media	7,38
		Fina	13,05
% FINOS	2,72		2,72

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	GP
Descripción :	GRAVA MAL GRADUADA CON ARENA

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-1-a (1)
Descripción (AASHTO)	EXC - BUENO

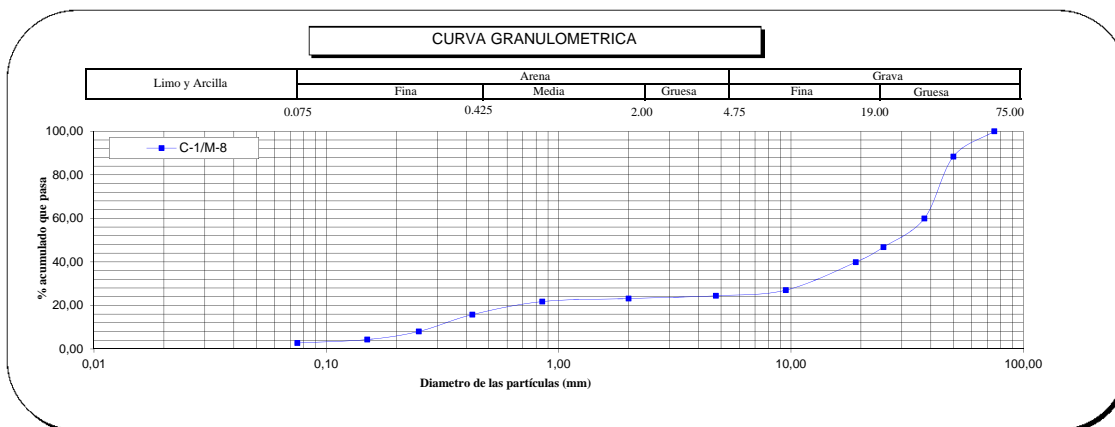
Norma ASTM D 2216

Contenido de Humedad (%)	2
----------------------------	---

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

D ₁₀ (mm)	0,29
D ₃₀ (mm)	11,71
D ₆₀ (mm)	37,52
Cu	127,39
Cc	12,41



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-209-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado : E.G.I.

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-2
Muestra :	M-1
Profundidad (m) :	0,60 - 1,60

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	100,00
		3/4"	19,000	100,00
		3/8"	9,500	100,00
		N° 004	4,750	100,00
		N° 010	2,000	99,90
		N° 020	0,850	99,26
		N° 040	0,425	95,30
		N° 060	0,250	86,66
		N° 100	0,150	74,13
N° 200	0,075	59,58		

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	ML
Descripción :	LIMO ARENOSO

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-4 (0)
Descripción (AASHTO)	POB - MALO

Norma ASTM D 2216

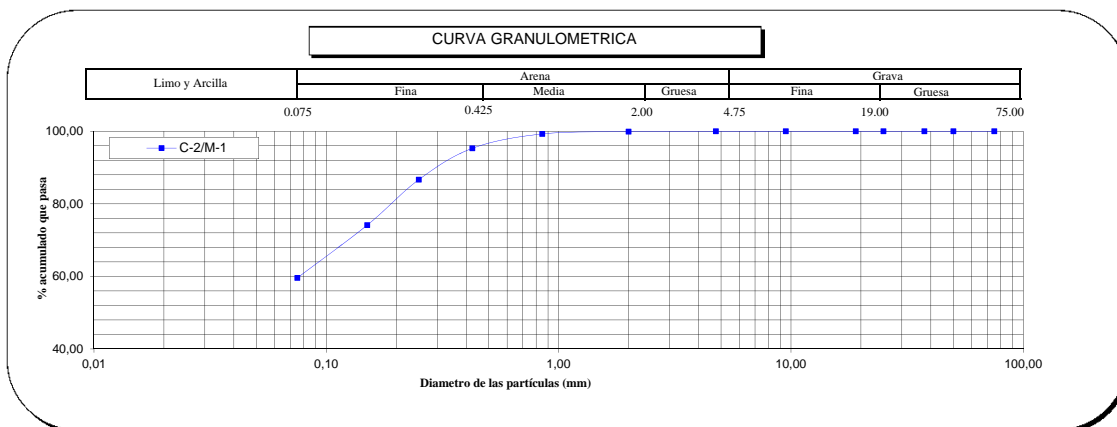
Contenido de Humedad (%)	8
--------------------------	---

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	18
Límite Plástico (LP)	16
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	2

% GRAVA		Gruesa	0,00
	0,00	Fina	0,00
		Gruesa	0,10
% ARENA	40,42	Media	4,60
		Fina	35,72
% FINOS	59,58		59,58

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	NP
D ₆₀ (mm)	0,08
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-211-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-2
Muestra :	M-2
Profundidad (m) :	1.60 - 2.40

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	100,00
		3/4"	19,000	100,00
		3/8"	9,500	100,00
		N° 004	4,750	100,00
		N° 010	2,000	99,89
		N° 020	0,850	99,71
		N° 040	0,425	99,18
		N° 060	0,250	96,89
		N° 100	0,150	89,98
		N° 200	0,075	75,39

% GRAVA	0,00	Gruesa	0,00
		Fina	0,00
% ARENA	24,61	Gruesa	0,11
		Media	0,72
		Fina	23,78
% FINOS	75,39		75,39

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	ML
Descripción :	LIMO ARENOSO

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-4 (0)
Descripción (AASHTO)	POB - MALO

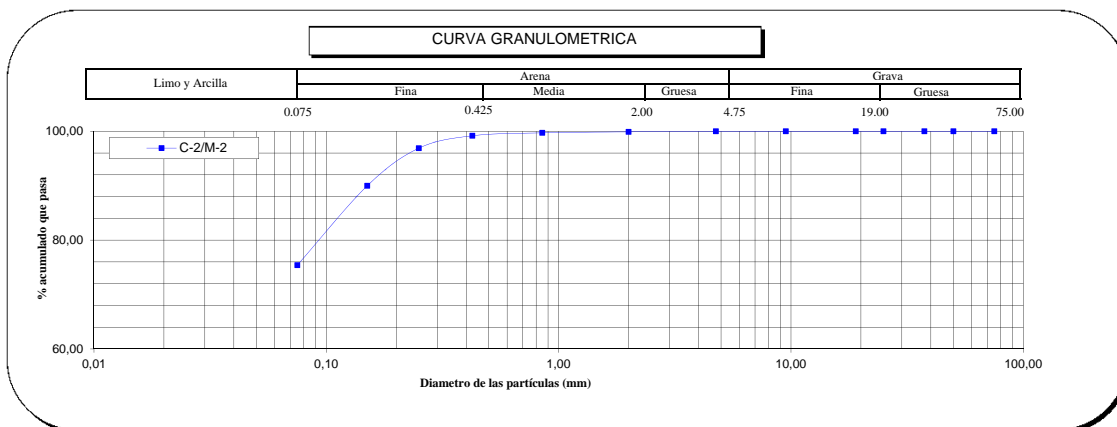
Norma ASTM D 2216

Contenido de Humedad (%)	10
----------------------------	----

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	22
Límite Plástico (LP)	21
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	1

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	NP
D ₆₀ (mm)	NP
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEC 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-203-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-2
Muestra :	M-3
Profundidad (m) :	2,40 - 3,40

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	77,89
		1 1/2"	37,500	62,53
		1"	25,000	40,46
		3/4"	19,000	34,95
		3/8"	9,500	29,57
		N° 004	4,750	28,31
		N° 010	2,000	27,03
		N° 020	0,850	24,12
		N° 040	0,425	19,16
		N° 060	0,250	15,66
		N° 100	0,150	13,14
		N° 200	0,075	11,33

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	GP-GM
Descripción :	GRAVA MAL GRADUADA CON LIMO Y ARENA

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-1-a (0)
Descripción (AASHTO)	EXC - BUENO

Norma ASTM D 2216

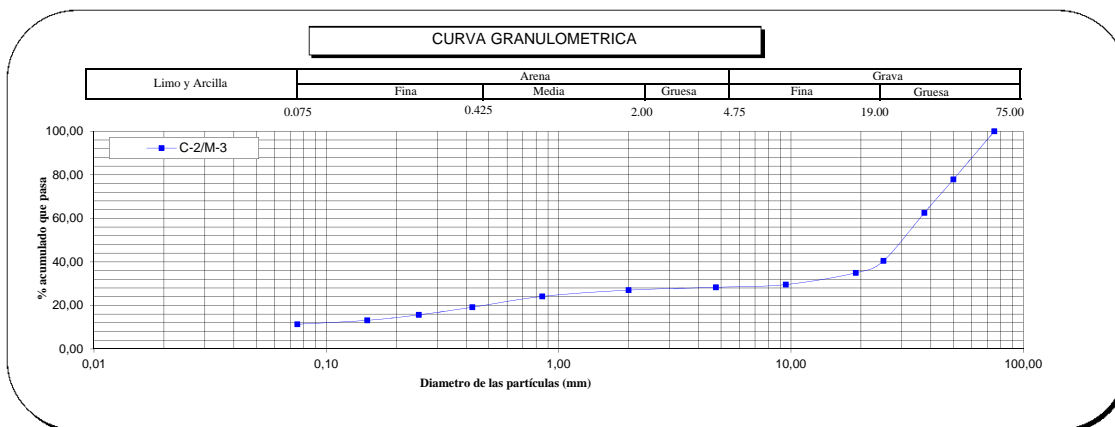
Contenido de Humedad (%)	2
--------------------------	---

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

% GRAVA	71,69	Gruesa	65,05
		Fina	6,65
		Gruesa	1,28
% ARENA	16,97	Media	7,87
		Fina	7,83
% FINOS	11,33		11,33

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	10,25
D ₆₀ (mm)	36,07
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-205-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-2
Muestra :	M-4
Profundidad (m) :	3,40 - 4,70

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	100,00
		3/4"	19,000	100,00
		3/8"	9,500	100,00
		N° 004	4,750	100,00
		N° 010	2,000	99,96
		N° 020	0,850	99,83
		N° 040	0,425	98,46
		N° 060	0,250	90,13
		N° 100	0,150	63,42
		N° 200	0,075	29,08

% GRAVA	0,00	Gruesa	0,00
		Fina	0,00
% ARENA	70,92	Gruesa	0,04
		Media	1,50
		Fina	69,38
% FINOS	29,08		29,08

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	SM
Descripción :	ARENA LIMOSA

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-2-4 (0)
Descripción (AASHTO)	EXC - BUENO

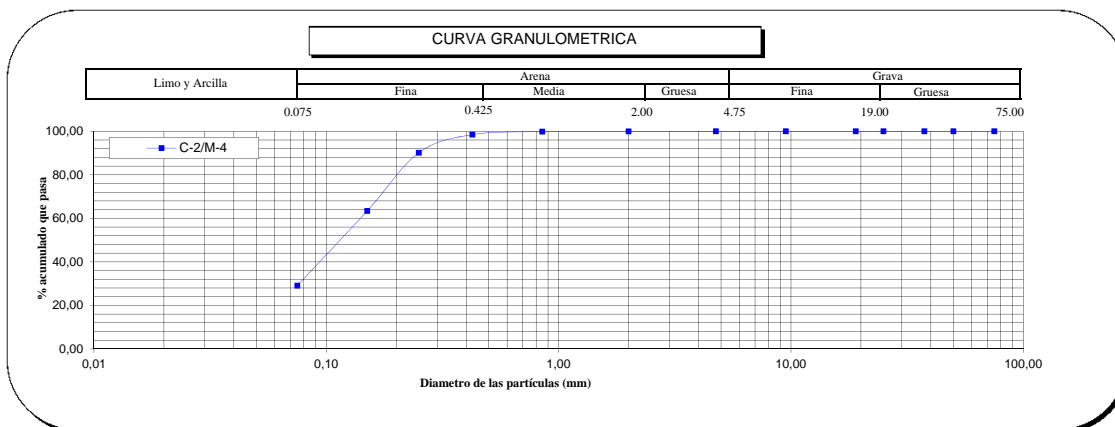
Norma ASTM D 2216

Contenido de Humedad (%)	6
--------------------------	---

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	0,08
D ₆₀ (mm)	0,14
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS

INFORME : TC-048-LG-204-2017

Página : 1/23

SOLICITANTE : COSAPI S.A.

Realizado: E.G.I.

DIRECCIÓN : Av República de Colombia 791, San Isidro 15046

Revisado : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACIÓN : AV. FAUCETT - AV. COLONIAL

Identificación de la muestra

Tramo :	C-2
Muestra :	M-5
Profundidad (m) :	4,70 - 5,30

FECHA RECEPCIÓN : 25/05/2017

FECHA DE ENSAYO : 30/05/2017

FECHA DE EMISIÓN : 31/05/2017

Norma ASTM D 422		MALLA	ABERTURA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	75,000	100,00
		2"	50,000	100,00
		1 1/2"	37,500	100,00
		1"	25,000	100,00
		3/4"	19,000	100,00
		3/8"	9,500	100,00
		N° 004	4,750	100,00
		N° 010	2,000	99,93
		N° 020	0,850	99,64
		N° 040	0,425	97,87
		N° 060	0,250	88,05
		N° 100	0,150	66,91
		N° 200	0,075	47,98

% GRAVA	0,00	Gruesa	0,00
		Fina	0,00
% ARENA	52,02	Gruesa	0,07
		Media	2,06
		Fina	49,89
% FINOS	47,98		47,98

Norma ASTM D 2487

Clasificación (S.U.C.S.)	SM
Descripción :	ARENA LIMOSA

Norma AASHTO M-145

Clasificación (AASHTO)	A-4 (0)
Descripción (AASHTO)	POB - MALO

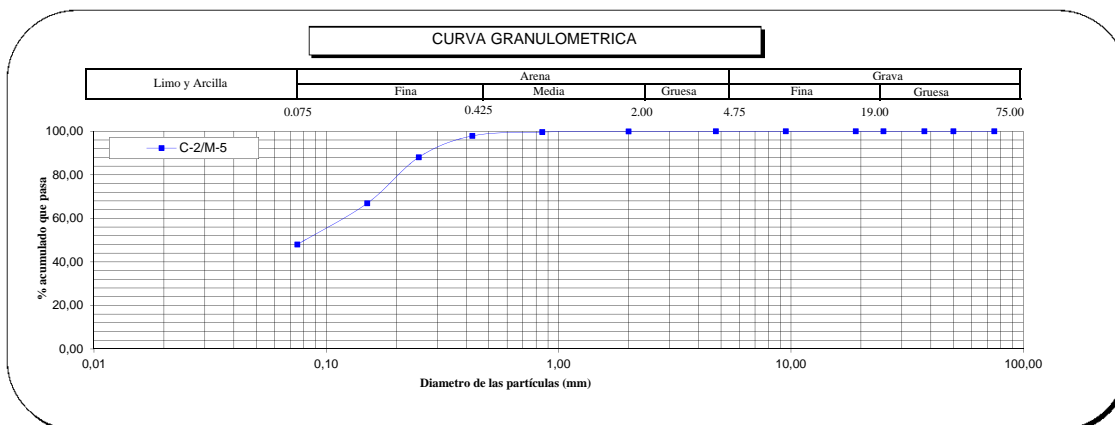
Norma ASTM D 2216

Contenido de Humedad (%)	15
----------------------------	----

Norma ASTM D 4318, Norma ASTM D 427

Límite Líquido (LL)	-
Límite Plástico (LP)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Índice Plástico (IP)	-

D ₁₀ (mm)	NP
D ₃₀ (mm)	NP
D ₆₀ (mm)	0,12
Cu	NP
Cc	NP



OBSERVACION :

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**ENSAYO PARA LA DETERMINACION DE SULFATOS SOLUBLES EN SUELOS Y AGUAS SUBTERRANEAS
(ASTM D-516, NTP 339, 178)**

INFORME : TC-048-LG-043-2017 **PAGINA** : 1/1

SOLICITANTE : COSAPI S.A. **REALIZADO:** E.G.I.

DIRECCION : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA **REVISADO** : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACION : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CALICATA : C-1 **FECHA RECEPCIÓN** : 25/05/2017

MUESTRA : M-2 **FECHA DE ENSAYO** : 30/05/2017

PROFUNDIDAD (msnm) : 1,85 - 2,20 **FECHA DE EMISIÓN** : 31/05/2017

DESCRIPCION	MEDIDAS Y RESULTADOS
Gramos de muestra de suelo (g)	50
Mililitros de agua para dilución (ml)	150
Mililitros de alicuota tomada (ml)	30
Gramos de suelo diluido en alicuota (g)	10
W Crisol (g)	19,3325
W Crisol + Muestra (g)	19,355
Total Sulfatos (ppm)	926

ml: Mililitros
g: Gramos
W: Peso
ppm: Partes por millón

OBSERVACIONES : La muestra fue tomada en campo
El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).

**ENSAYO PARA LA DETERMINACION DE SULFATOS SOLUBLES EN SUELOS Y AGUAS SUBTERRANEAS
(ASTM D-516, NTP 339, 178)**

INFORME : TC-048-LG-042-2017 **PAGINA** : 1/1

SOLICITANTE : COSAPI S.A. **REALIZADO:** E.G.I.

DIRECCION : AV. REPÚBLICA DE COLOMBIA N° 791, URB. CHACARILLA DE SANTA CRUZ - DISTRITO DE SAN ISIDRO - LIMA **REVISADO** : P.T.C.

PROYECTO : DISEÑO DE TUNEL LINER EN CRUCE DE LA AVENIDA FAUCETT

UBICACION : CRUCE DE LA AV. FAUCETT Y AV. OSCAR R. BENAVIDES

CALICATA : C-1 **FECHA RECEPCIÓN** : 25/05/2017

MUESTRA : M-6 **FECHA DE ENSAYO** : 30/05/2017

PROFUNDIDAD (msnm) : 4,80 - 5,20 **FECHA DE EMISIÓN** : 31/05/2017

DESCRIPCION	MEDIDAS Y RESULTADOS
Gramos de muestra de suelo (g)	50
Mililitros de agua para dilución (ml)	150
Mililitros de alicuota tomada (ml)	30
Gramos de suelo diluido en alicuota (g)	10
W Crisol (g)	18,6542
W Crisol + Muestra (g)	18,6658
Total Sulfatos (ppm)	477

ml: Mililitros
g: Gramos
W: Peso
ppm: Partes por millón

OBSERVACIONES : La muestra fue tomada en campo
El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (NTP - ISO/IEX 17025-2006).