



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE FASE I

**MANUAL DE DISEÑO PRELIMINAR DE TÚNELES DE CARRETERA EN SAN PEDRO SULA,
HONDURAS**

PRESENTADO POR:

21741102 DANIEL ARMANDO CABALLERO CALDERINI

20911208 RONEY JARED URIAS MARTÍNEZ

21711153 PAOLA JARUFE LARACH

ASESOR: ING. MICHAEL JOB PINEDA
CAMPUS UNITEC S.P.S.; ENERO, 2022

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

UNITEC

PRESIDENTE EJECUTIVA

ROSALPINA RODRÍGUEZ GUEVARA

VICERRECTOR ACADÉMICO

DESIREÉ TEJADA CALVO

RECTOR ACADÉMICO

MARLON ANTONIO BREVÉ REYES

SECRETARIO GENERAL

ROGER MARTÍNEZ MIRANDA

VICEPRESIDENTA CAMPUS SAN PEDRO SULA

MARIA ROXANA ESPINAL MONTEILH

JEFE ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

HÉCTOR WILFREDO PADILLA

TRABAJO PRESENTADO EN CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS

EXIGIDOS PARA OPTAR AL TÍTULO

INGENIERO CIVIL

ASESOR METODOLÓGICO FASE I

“ING. MICHAEL JOB PINEDA”

ASESOR TEMÁTICO

“ING. SERGIO FRANCISCO PAREDES”

“ING. MARIO HUMBERTO CÁRDENAS MURILLO”

MIEMBROS DE LA TERNA

“ING. ÁNGEL DAVID FUNEZ”

“ING. ARNOLD DAVID JOVEL”

“ING. ADA SOBAYDA RODRIGUEZ”

DERECHOS DE AUTOR

©COPYRIGHT 2022

DANIEL ARMANDO CABALLERO CALDERINI

RONEY JARED URÍAS MARTÍNEZ

PAOLA JARUFE LARACH

Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

En primera instancia quiero dedicarle este logro a Dios que me envió a esta tierra para formar parte de ella y para cumplir con su plan divino, también le agradezco el camino que me ha forjado y junto con él a la gente que me ha presentado y que yo he llegado a considerar como familia y amigos. Quiero dedicarle este logro a mi madre, Glenda Calderini, la mujer que me dio la vida y que si no fuera por ella yo jamás me encontraría en mi actual posición y sin ella no hubiera podido cumplir mis sueños; también le dedico este logro mi padre, Sergio Caballero, que me ha apoyado estando tanto lejos como cerca de mí aun en los momentos en los que creí que no podía lograr nada, siendo él un padre justo y amoroso. Le dedico este logro a mis abuelos maternos, Wilfredo Calderini y Orbelina Rosales, que fueron como mis segundos padres que me ayudaron en la formación de la persona que soy hasta el día de hoy.

Quiero dedicarle esto a mi *cuadrilla de amigos*, que muchos de ellos ya han cumplido con su meta y están a la espera de que me les una, también a mis compañeros de proyecto, a quienes conocí realmente en circunstancias atípicas, Paola Larach y Jared Urías, por elegir culminar esta última etapa educativa conmigo, le dedico este logro a mis catedráticos que se tomaron el tiempo para inculcarme su vasto conocimiento durante estos últimos cinco años.

Daniel A. Caballero

Esta tesis está dedicada a mis padres, Karla Larach y Robert Jarufe, por ser mis pilares más importantes y por demostrarme su amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. A mis hermanos, Ivan Jarufe y Eric Jarufe, porque sin ellos dos no fuese la guerrera que soy hoy. A los cuatro los amo con todo mi corazón, siempre serán los reyes y reina de mi vida.

A mis compañeros de tesis, Daniel Caballero y Jared Urías, con ustedes he tenido la oportunidad de culminar exitosamente la carrera universitaria y por eso los aprecio bastante. A mis compañeros y amigos de la universidad, sus risas y sus historias estarán siempre presente en mi mente.

Paola J. Larach

Esta tesis está dedicada a mis padres quienes con su paciencia, esfuerzo y amor me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de valentía y perseverancia, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

Roney J. Urías

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por otorgarnos la oportunidad de culminar nuestra formación profesional en una de las instituciones más prestigiosas de Centroamérica, la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC). A nuestros padres por su apoyo incondicional a lo largo de todo el proceso educativo, agradecemos su sacrificio y lo mucho que invirtieron, eso incluye tiempo y dinero, a lo largo de estos cinco años, estamos en deuda con ustedes y esperamos devolverles el favor en el futuro si así lo quiere Dios.

Agradecemos a nuestros docentes y asesores por su valiosa ayuda y por brindarnos su tiempo en estos cinco años de estudio: Msc. Ing. Michael Pineda por su contribución como asesor metodológico, catedrático encargado de los laboratorios, entre otras clases de la carrera.

Finalmente, agradecemos a nuestros compañeros y futuros colegas, que nos han apoyado y motivado sobre la marcha, esto es por ustedes.



RESUMEN EJECUTIVO

El manual de diseño preliminar de túneles de carretera en San Pedro Sula, Honduras, fue creado con el fin de instruir a los ingenieros civiles de la zona a la metodología utilizada actualmente para el diseño de túneles carreteros con sección típica. Este manual brinda las generalidades de un túnel carretero, los estudios geológicos y geotécnicos necesarios, las bases para el diseño geométrico y estructural, la señalización e iluminación según las normas internacionales, el mantenimiento preventivo y correctivo de un túnel carretero y el sistema hidráulico. La metodología implementada es mixta, incluye en la parte cuantitativa un tipo de estudio no experimental, un tipo de diseño transversal, un alcance descriptivo, un método exploratorio secuencial, un tipo de muestra no probabilística y se recopiló información con la técnica de encuesta. Para el enfoque cualitativo se implementó la técnica de entrevista para recopilar información técnica de ingenieros civiles y así complementar la información obtenida mediante el enfoque cuantitativo. De los cuestionarios se obtuvo que el 92% de los encuestados consideran necesario la implementación de más túneles carreteros en la ciudad de San Pedro Sula y que funcionaría como alternativa para solucionar varios problemas de tránsito que actualmente se experimentan en la ciudad. El manual se basa en las normas internacionales: NHI (National Highway Institute), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el Manual de Carreteras de Perú; y las normas nacionales: SOPTRAVI (Secretaría de Estado en los Despachos de Obras Públicas, Transporte y Vivienda).

Palabras Clave: túnel carretero, manual, norma, solución vial, San Pedro Sula



ABSTRACT

The preliminary design manual for road tunnels in San Pedro Sula, Honduras, was created with the purpose of instructing civil engineers in the area on the methodology currently used for the design of road tunnels with a typical section. This manual provides the generalities of a road tunnel, the necessary geological and geotechnical studies, the bases for the geometric and structural design, the signaling and illumination according to international standards, the preventive and corrective maintenance of a road tunnel and the hydraulic system. The methodology implemented is mixed, it includes in the quantitative part a non-experimental type of study, a transversal type of design, a descriptive scope, a sequential exploratory method, a non-probabilistic type of sample and information was collected with the survey technique. For the qualitative approach, the interview technique was implemented to collect technical information from civil engineers to complement the information obtained through the quantitative approach. From the surveys it was obtained that 92% of those surveyed consider it necessary to implement more road tunnels in the city of San Pedro Sula and that it would work as an alternative to solve several traffic problems currently experienced in the city. The manual is based on international standards: NHI (National Highway Institute), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) and the Peruvian Highway Manual; and national standards: SOPTRAVI (Secretary of State in the Offices of Public Works, Transportation and Housing).

Key words: road tunnel, manual, standard, road solution, San Pedro Sula

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	1
II.	Planteamiento del problema.....	2
2.1.	Precedentes del problema	2
2.2.	Definición del problema	5
2.2.1.	Enunciado del problema.....	5
2.2.2.	Formulación del problema	5
2.3.	Justificación	6
2.4.	Preguntas de investigación	7
2.5.	Objetivos	7
2.5.1.	Objetivo General	7
2.5.2.	Objetivos Específicos	8
III.	Marco Teórico.....	9
3.1.	Análisis de la situación actual.....	9
3.1.1.	Análisis del macroentorno.....	9
3.1.1.1.	Diseño estructural de un tercer túnel vehicular en lo Prado, Chile.....	9
3.1.1.2.	Procesos constructivos para túneles viales desarrollados en Colombia	20
3.1.1.3.	Proyecto de ejecución de túnel carretero en Oyón, Perú.....	23
3.1.2.	Análisis del microentorno	25
3.1.2.1.	Construcción del túnel en el bulevar La Hacienda, Tegucigalpa	25
3.1.2.2.	Construcción del túnel de la colonia La Reforma, Tegucigalpa.....	27
3.1.2.3.	Construcción del túnel en el bulevar Suyapa, Tegucigalpa.....	28

3.1.3.	Análisis Interno.....	29
3.1.3.1.	Construcción del túnel entre la 27 y 28 calle del bulevar del sur, SPS.....	29
3.1.3.2.	Construcción del túnel en el centro comercial “City Mall”, SPS	31
3.1.3.3.	Zonificación de suelos de la ciudad de San Pedro Sula, Cortés	32
3.2.	Teoria de Sustento.....	36
3.2.1.	Manual de Carreteras – Tomo 3 Instrucciones de Diseño	36
3.2.2.	Manual de Carreteras – Tuneles, Muros y Obras Complementarias.....	41
3.2.3.	LRFD Road Tunnel Design and Construction Guide Specifications	49
3.2.4.	Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels.....	52
3.2.5.	Alcance, Ventajas y Limitaciones	63
3.2.5.1.	Alcance.....	63
3.2.5.2.	Ventajas.....	63
3.2.5.3.	Limitaciones.....	64
3.3.	Marco Conceptual	64
3.4.	Marco Legal.....	68
IV.	Metodologia.....	69
4.1.	Enfoque.....	69
4.2.	Variables de Investigación.....	70
4.2.1.	Diagrama de las Variables de Investigación	71
4.2.2.	Tabla de Operacionalizacion	72
4.3.	Técnicas e Instrumentos Aplicados.....	87
4.3.1.	Instrumentos.....	87
4.3.2.	Tecnicas.....	124

4.4. Población y Muestra.....	126
4.4.1. Población	126
4.4.2. Tamaño de la muestra	127
4.5. Metodología de Estudio.....	127
4.5.1. Tipo de Diseño.....	128
4.6. Cronograma de Actividades	130
V. Análisis de Resultados	135
5.1. Tabulación de cuestionarios.....	135
5.1.1 Cuestionario dirigido a los habitantes	136
5.1.2 Cuestionario dirigido a los habitantes	146
5.2. Resumen de Variables.....	164
5.3. Entregable	167
VI. Conclusiones	168
VII. Recomendaciones.....	171
VIII. Aplicabilidad	172
Bibliografía	173
Anexos.....	177

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Metodología propuesta por la SAG	11
Ilustración 2 - Clasificación de la calidad de la roca según el índice RMR.....	14
Ilustración 3 - Clasificación Geomecánica de Bieniawski	15
Ilustración 4 - Rango de Variación de Parámetros.....	17
Ilustración 5 - Clasificación del Índice Q	18
Ilustración 6 - Características Túnel Lo Prado N°3	19
Ilustración 7 - Mapa actual de la geología colombiana	20
Ilustración 8 - Esquema del túnel Segundo Centenario.....	22
Ilustración 9 - Mapa geológico de la zona.....	23
Ilustración 10 - Sección transversal del túnel.....	24
Ilustración 11 - Modelo 3D del túnel vehicular	26
Ilustración 12 - Ubicación y uso previsto del túnel.....	28
Ilustración 13 - Modelo 3D del túnel ubicado en el bulevar	30
Ilustración 14 – Mapa de los cuadrantes estudiados, San Pedro Sula.....	32
Ilustración 15 – Clasificación SUCS del Cuadrante #1 (Noroeste).....	33
Ilustración 16 – Clasificación SUCS del Cuadrante #2 (Noreste).....	34
Ilustración 17 - Radios mínimos absolutos	37
Ilustración 18 - Ancho de calzada según el tipo de carretera.....	38
Ilustración 19 - Valores del factor K para curvas convexas	39
Ilustración 20 - Parámetros de diseño geométrico resumido.....	40
Ilustración 21 - Radios mínimos y peraltes máximos	45

Ilustración 22 - Pendientes y rampas máximas.....	47
Ilustración 23 - Combinaciones de carga.....	51
Ilustración 24 - Factores de carga según su tipo	52
Ilustración 25 - Clasificación de parámetros individuales para el sistema Q	59
Ilustración 26 - Sistema Rock Mass Rating.....	61
Ilustración 27 - Requerimiento de soporte de roca usando el índice Q.....	62
Ilustración 28 - Diagrama de las variables de operacionalización.....	71
Ilustración 29 – Encuesta de investigación dirigida a los habitantes de San Pedro Sula.....	103
Ilustración 30 – Encuesta de investigación dirigida a los ingenieros civiles.....	122
Ilustración 31 - Diagrama del diseño de la investigación.....	128
Ilustración 32 - Cronograma de actividades.....	130
Ilustración 33 - Respuesta a la pregunta #1 H.S.P.S.	136
Ilustración 34 - Respuesta a la pregunta #2 H.S.P.S.	137
Ilustración 35 - Respuesta a la pregunta #3 H.S.P.S.	137
Ilustración 36 - Respuesta a la pregunta #4 H.S.P.S.	138
Ilustración 37 - Respuesta a la pregunta #5 H.S.P.S.	139
Ilustración 38 - Respuesta a la pregunta #6 H.S.P.S.	140
Ilustración 39 - Respuesta a la pregunta #7 H.S.P.S.	141
Ilustración 40 - Respuesta a la pregunta #8 H.S.P.S.	141
Ilustración 41 - Respuesta a la pregunta #9 H.S.P.S.	142
Ilustración 42 - Respuesta a la pregunta #10 H.S.P.S.....	143
Ilustración 43 - Respuesta a la pregunta #11 H.S.P.S.....	143
Ilustración 44 - Respuesta a la pregunta #12 H.S.P.S.....	144

Ilustración 45 - Respuesta a la pregunta #1 I.C.E.....	146
Ilustración 46 - Respuesta a la pregunta #2 I.C.E.....	147
Ilustración 47 - Respuesta a la pregunta #3 I.C.E.....	148
Ilustración 48 - Respuesta a la pregunta #4 I.C.E.....	149
Ilustración 49 - Respuesta a la pregunta #11 I.C.E.....	152
Ilustración 50 - Respuesta a la pregunta #14 I.C.E.....	154
Ilustración 51 - Respuesta a la pregunta #15 I.C.E.....	155
Ilustración 52 - Respuesta a la pregunta #16 I.C.E.....	156
Ilustración 53 - Respuesta a la pregunta #17 I.C.E.....	157
Ilustración 54 - Respuesta a la pregunta #18 I.C.E.....	158
Ilustración 55 - Respuesta a la pregunta #19 I.C.E.....	158
Ilustración 56 - Respuesta a la pregunta #20 I.C.E.....	159
Ilustración 57 – Asesoría #2 con el Ing. Mario Cárdenas vía WhatsApp.....	178
Ilustración 58 – Asesoría #3 con el Ing. Mario Cárdenas vía Google Meets.....	179
Ilustración 59 – Asesoría #4 con el Ing. Sergio Paredes vía Google Meets	179
Ilustración 60 – Artículo sobre el inicio de las excavaciones para el túnel de la 27 y 28 calle.....	180
Ilustración 61 – Artículo sobre la habilitación del túnel de la 27 calle en San Pedro Sula.....	180
Ilustración 62 – Artículo sobre la habilitación del túnel frente a La Reforma	181
Ilustración 63 – Artículo sobre la habilitación del túnel en el bulevar Suyapa	181

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Variables de Operacionalización	70
Tabla 2 - Tabla de Operacionalización.....	72

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 - Índice Q de Barton.....	16
Ecuación 2 - Correlación entre índices RMR y Q.....	18
Ecuación 3 - Distancia mínima de visibilidad	43
Ecuación 4 - Distancia de visibilidad en un túnel en curva	44
Ecuación 5 - Longitudes en base a la velocidad de diseño.....	45
Ecuación 6 - Muestra no probabilística	127

I. INTRODUCCION

En las últimas dos décadas los regentes de la república de Honduras han buscado innovar varios de los sectores económicos que componen el país, entre ellos, el sector correspondiente a la construcción y el transporte. El sistema de carreteras de Honduras es manejado por la Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda de Honduras (SOPTRAVI), a través de la Dirección General de Carreteras, la cual se encarga de planificar los proyectos de construcción y rehabilitación de las obras viales, del país. Examinando los manuales que brinda SOPTRAVI para el diseño preliminar de carreteras se puede apreciar que no hay ninguna referencia en cuanto al diseño e implementación de túneles de carretera en ninguno de sus ocho tomos hasta la fecha.

Al cabo de cumplir con los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) lo más pronto posible, los proyectos viales han ido escalando en los últimos años y han adquirido más demanda, en especial en San Pedro Sula que es conocida como la capital industrial del país, debido a esto los proyectos viales se han vuelto aún más ambiciosos. Un túnel de carretera es una construcción a la que se recurre para acortar un determinado recorrido, atravesando normalmente un estrato de suelo o cuerpo de agua. Debido a las ventajas que estas obras brindan a corto plazo, últimamente en Honduras se han ido implementando en sus ciudades más desarrolladas, siendo las primeras San Pedro Sula y Tegucigalpa, con el objetivo de aliviar el tránsito vehicular excesivo en sus zonas más críticas. Como consecuencia de lo anterior, surge la necesidad de contar con un manual para el diseño preliminar de túneles de carretera en San Pedro Sula que se pueda utilizar como referencia para los futuros proyectos viales de la ciudad.

El presente documento propondrá la metodología para la construcción de túneles carreteros con sección típica para la ciudad de San Pedro Sula dando camino a una implementación de obras subterráneas, como lo son túneles carreteros, en sus futuros proyectos viales. Este manual fue constituido por un grupo de tres estudiantes a optar por el título de Ingeniero Civil, bajo la tutela de profesionales con experiencia en el desarrollo de proyectos viales, obras subterráneas y siguiendo las normativas existentes.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una vez comprendida la temática expuesta con anterioridad, a continuación, se da a conocer el planteamiento del problema, el cual se compone de precedentes que definen su origen de una manera más específica, la justificación del interés por resolverlo y las preguntas que ayudarán a establecer el contenido de esta investigación.

2.1. PRECEDENTES DEL PROBLEMA

En la República de Honduras en el año 1957 se funda la entidad conocida como la Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda (SOPTRAVI), automáticamente esta organización pasa a pertenecer y depender del Poder Ejecutivo, con el objetivo principal de hacerse cargo de todo lo concerniente a la formulación, coordinación, ejecución y evaluación de políticas relacionadas con la vivienda, las obras de infraestructura pública, el sistema vial, urbanístico y del transporte, así como el régimen concesionario de obras públicas. (SOPTRAVI, 2012)

En base a lo establecido por SOPTRAVI se fueron promoviendo varios proyectos constructivos, no necesariamente viales en su totalidad, ya que SOPTRAVI en un principio estaba dentro del organigrama del Ministerio del Interior, con el fin de realizar en el país proyectos de desarrollo sostenible: muelles, ferrocarriles, carreteras, aeropuertos, vías de verano, entre otros.

Con el pasar de los años, y con los cambios en la presidencia de la república, muchas de las organizaciones y secretarías pertenecientes al Poder Ejecutivo fueron cambiando de nombre para adoptar nuevas funciones, como consecuencia de esto también se crearon nuevas entidades como es el caso del Fondo Hondureño de Inversión Social (FHIS) el cual nació mediante el decreto No. 12-90 del mes de febrero del año 1990, bajo el mandato del presidente de la república el Lic. Rafael Leonardo Callejas, con el objetivo de promover el mejoramiento de las condiciones de vida de los grupos sociales marginados en el área Rural y Urbana, mediante otorgamientos de financiamientos para Programas y Proyectos de desarrollo social o económico. (FHIS, 1990)

Mientras se iban creando y desarrollando nuevas instituciones en el país, SOPTRAVI fue enfocándose en una de sus principales atribuciones que conllevó a realizar el estudio, planeación, diseño, supervisión y construcción del Sistema Vial del País y el Mantenimiento y Modernización del Sistema. Para llevar a cabo esta tarea, SOPTRAVI contrató los servicios de una Firma Consultora especializada en la rama vial, para la ejecución de estudios y la elaboración de un "MANUAL DE CARRETERAS" específico para la República de Honduras, dicho manual se publicó en diciembre del año 1996. (SOPTRAVI, 1996)

En los siguientes 20 años se fueron desarrollando una innumerable cantidad de proyectos viales empleando lo recopilado en el "MANUAL DE CARRETERAS", este fue dividido en siete tomos para distribuir mejor la información que concernía al diseño de carreteras y un tomo adicional que hace referencia a las buenas prácticas ambientales a tomar en cuenta.

Aun teniendo el medio para elaborar un correcto diseño de carreteras muchos de los proyectos viales que hasta el día de hoy perduran han sido severamente criticados.

Panting (2013) menciona:

Hace unos 20 años teníamos la mejor red vial de Centroamérica, pero a través de los años se descuidaron estas vías y ahora tenemos las peores. Con la Ley del Fondo Vial, que es una dependencia de (Soptravi), se suponía que se garantizaba el mantenimiento correcto a estas vías con los fondos que se obtuvieran de los impuestos cobrados a los combustibles; pero es obvio que los recursos no han sido usados para este fin en la medida que indica la ley y por eso el descuido de las carreteras. (parr. 4)

En el año 2014 hubo un cambio de regente en el país de Honduras, siendo el nuevo presidente de la república el abogado Juan Orlando Hernández Alvarado, debido a esto la entidad de SOPTRAVI paso a conocerse como la Secretaría de Infraestructura y Servicios Públicos (INSEP) de Honduras, esta nueva entidad paso a estar a cargo del desarrollo de proyectos de infraestructura social, como el mantenimiento y mejora de carreteras, puertos, corredores logísticos y turísticos, y puentes. (CENISS, 2021)

Paralelo a estos eventos, varios países de Latinoamérica ya se habían adentrado en lo que es el desarrollo e implementación de túneles carreteros, al igual que túneles ferroviarios, desde mediados del siglo pasado como lo puede ser el caso de Colombia. El desarrollo del Programa de Cuarta Generación de Concesiones Viales (4G), que incluyen la duplicación de vías existentes, ha exigido proyectos que superen las complejas condiciones topográficas del país, por lo que en los últimos años Colombia se ha convertido en referencia de construcción de túneles, teniendo en la actualidad cuatro de los cinco túneles con mayor longitud en América Latina. (López & Gutiérrez, 2021)

Otro país semejante a Honduras es Chile que, debido a su geografía, siendo un país que cuenta con grandes sistemas montañosos ha dado origen a este tipo de construcciones para enlazar en forma más expedita ciudades o lugares de importancia y facilitar los transportes más diversos. Dado al notable crecimiento en la última década ha sido necesario estudiar nuevas alternativas de tránsito mejorando así los niveles de servicio. (Soto, 2004)

Sintiéndose relacionado con esta problemática, el gobierno buscó darle solución al crecimiento del tráfico vehicular en las ciudades con mayor índice poblacional, siendo estas San Pedro Sula y Tegucigalpa, por medio de la implementación de túneles carreteros en las zonas de mayor congestión. Actualmente existen dos túneles en San Pedro Sula ubicados en el bulevar del sur, entre la 27 y 28 calle, mientras que en Tegucigalpa existen más de cinco túneles, cuatro se encuentran en proceso de construcción, tres de ellos peatonales y comerciales, uno en el bulevar Centroamérica y dos en el bulevar Suyapa, cerca de Metrópolis. (Gonzales, 2021)

2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En referencia a lo expuesto anteriormente se tratará de definir el problema, evidenciandola necesidad de un manual para el diseño preliminar de túneles de carretera que ayude en la ampliación futura del sistema vial de San Pedro Sula y que consigo venga una reducción considerable del tránsito vehicular visto hasta la actualidad y un alto desarrollo socioeconómico por parte de la misma ciudad como consecuencia de la implementación de estos elementos.

2.2.1. ENUNCIADO DEL PROBLEMA

A continuación, se presenta el enunciado del problema, el cual determina el propósito principal por el cual se desarrolla la investigación propuesta.

“Para el año 2021 el municipio de San Pedro Sula carece de una guía o manual que funja como instructivo para el correcto diseño e implementación de túneles carreteros tomando en cuenta las características geológicas de la zona”.

2.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Por consiguiente, se expresa la formulación del problema que propone la siguiente macro pregunta:

¿Qué normativas, procedimientos y detalles constructivos deberá integrar un manual de diseño preliminar para túneles de carretera, en función de las necesidades de los ingenieros civiles y los transeúntes en San Pedro Sula, Honduras, 2021?

2.3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, el municipio de San Pedro Sula cuenta con una población de 777,877 de personas las cuales están compuestas por 369,197 hombres y 408,680 mujeres. (INE, 2018) Paralelo a la población, el parque activo en San Pedro Sula es de 305,256 vehículos, de los cuales 226,189 son automóviles y 79,067 son motocicletas registradas. (Baquedano, 2021) San Pedro Sula cuenta con una de las redes viales más importantes del país por lo que es normal que a ciertas horas del día se logren apreciar congestionamientos en varios de sus sectores, específicamente los que se ubican en las entradas de la ciudad, esto debido a la gran cantidad de vehículos que ingresan de los municipios vecinos en combinación con los que tiene San Pedro Sula actualmente.

En los últimos cinco años, la Alcaldía Municipal de San Pedro Sula ha buscado hacerle frente a esta problemática de diversas formas, entre ellas está la renovación y modernización de varias de las vías ya existentes en la ciudad sin dejar por fuera el hecho de que también se han construido nuevas vías como parte del Plan Maestro de Desarrollo Urbano (PMDU) como medida para disminuir el tránsito vehicular, pero en el plan no se hace ninguna mención acerca de la construcción de túneles o cualquier otra obra subterránea. (Alcaldía Municipal, 2018)

Como actividad más reciente e innovadora se han comenzado a implementar obras subterráneas en San Pedro Sula para alivianar el tránsito vehicular en las zonas de mayor necesidad, siendo el más grande ejemplo el de los dos túneles ubicados en la 27 y 28 calle, sobre el bulevar del sur, cuya construcción inició en el 2017 y concluyó en el año 2018; esta obra ha logrado cumplir con su principal objetivo que es el de descongestionar en gran medida la zona, acortando la distancia para cambiar de calle y reduciendo accidentes vehiculares en el proceso. A pesar de que estas obras ya existen en Honduras, se logra apreciar que en pleno 2021 no existe ningún instructivo en forma de guía o manual que profundice en el tema de diseño e implementación de túneles de carretera tomando como principal localización la ciudad de San Pedro Sula.

Bajo este precepto es factible presentar un documento que sea capaz de abarcar el tema de diseño haciendo referencia a túneles carreteros para que este se pueda aplicar en algún futuro para un proyecto vial público o privado en la ciudad de San Pedro Sula.

2.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- 1) ¿Qué ensayos in situ y de laboratorio se deben aplicar para determinar que zonas en San Pedro Sula cumplen con los requisitos geotécnicos para construir un túnel de carretera?
- 2) ¿Cuáles son las normativas nacionales e internacionales que brindan información con respecto a procedimientos, maquinaria y materiales requeridos para un túnel de carretera?
- 3) Según las exigencias constructivas de los ingenieros civiles en San Pedro Sula ¿Qué recomendaciones técnicas para el diseño preliminar de túneles carreteros con sección típica se abordarán en el manual?
- 4) ¿Qué exigencias del usuario se deberán considerar para que el túnel carretero sea un espacio físico seguro y protegido?
- 5) ¿Cuál será el contenido de relevancia y necesidad en el manual para el diseño preliminar de túneles de carretera con sección típica aplicado en la ciudad de San Pedro Sula?

2.5. OBJETIVOS

Con el fin de direccionar la investigación y declarar un alcance más certero se establecen los siguientes objetivos, dividiéndose en general y específicos. El general brindará el concepto absoluto de la investigación, es decir la idea principal y los específicos enlistarán las acciones que serán llevadas a cabo para completar con éxito lo que se busca exponer en el presente manual.

2.5.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general dicta qué se realizará dentro de la investigación, cómo o mediante qué metodologías se hará y el para qué de la misma.

Proponer un manual para el diseño preliminar de túneles de carretera en la ciudad de San Pedro Sula, mediante la centralización de la normativa estadounidense AASHTO y la normativa peruana MTC; para su implementación en proyectos viales subterráneos futuros.

2.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos generan una relación uno a uno con las preguntas de investigación expuestas, con el fin de indicar lo que se desconoce y brindar una respuesta.

- 1) Identificar los ensayos in situ y de laboratorio a aplicar para determinar que zonas en San Pedro Sula cumplen con los requisitos geotécnicos para construir un túnel de carretera.
- 2) Indicar las normativas nacionales e internacionales necesarias para los procedimientos, la maquinaria y los materiales requeridos para un túnel carretero con sección típica.
- 3) Establecer las recomendaciones técnicas pertinentes, según las exigencias constructivas de los ingenieros civiles en San Pedro Sula, para el diseño preliminar de túneles carreteros con sección típica.
- 4) Recopilar las exigencias del usuario para ser aplicadas en el diseño preliminar del túnel carretero elaborando un espacio seguro y protegido.
- 5) Especificar el contenido de relevancia y necesidad comprendido en el manual para el diseño preliminar de túneles de carretera con sección típica en San Pedro Sula, Honduras.

III. Marco Teórico

Una vez identificada la problemática del proyecto a la que se le dará respuesta, se procederá a obtener la información que servirá de sustento en la investigación. A continuación, se presenta el marco teórico que incluye la extracción y recopilación de información acerca de la situación actual del diseño de túneles carreteros en San Pedro Sula, así como cualquier otra información relevante que enriquezca el conocimiento del tema. Con respecto al marco conceptual, este ayudará a construir una mejor interpretación del problema, por último, el marco legal que a través de normas, leyes y reglamentos justifica el desarrollo de la investigación.

3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

A continuación, se expondrá un análisis actual sobre el entorno nacional e internacional que abarca el área del proyecto, en el que se citará información que servirá para elaborar un manual que contribuya de manera significativa con el desarrollo de los alcances expuestos a lo largo del capítulo II dentro de los objetivos de este documento.

3.1.1. ANÁLISIS DEL MACROENTORNO

En este apartado se mostrarán proyectos desarrollados en diferentes países, como pueden ser países de Latinoamérica y en casos más extremos países del resto del mundo, que hacen referencia a elementos que pueden ser de vital importancia para el desarrollo del documento final.

3.1.1.1. Diseño estructural de un tercer túnel vehicular en Lo Prado, Chile

El presente documento hace hincapié al diseño preliminar, de carácter estructural, de un túnel vehicular en Lo Prado, ubicado en el sector norponiente de la ciudad de Santiago, capital de Chile. En dicho proyecto se realiza:

Un estudio preliminar y de prefactibilidad económica de un nuevo túnel vehicular en el sector de Lo Prado, Ruta 68. Este trabajo, es realizado para la División de Construcción de la Dirección General de Concesiones de Obras Públicas, del Ministerio de Obras Públicas (MOP). (Ruiz, 2019, p. i)

El presente trabajo de título tiene como objetivo principal determinar la prefactibilidad de realizar un tercer túnel vehicular en el sector de Lo Prado, Ruta 68, denominado Túnel Lo Prado N°3. (Ruiz, 2019, p. i)

Con este propósito, se propone un trazado referencial asociado a un corredor donde se recomienda ubicar la nueva obra. Con estos elementos se analiza un diseño geomecánico, con el cual se realiza una estimación de costos y tiempo de construcción para la obra. (Ruiz, 2019, p. i)

El diseño preliminar de un túnel, ya sea para una carretera o para un ferrocarril, consta en primera instancia de un análisis del terreno para determinar la factibilidad del mismo, esto lleva a una aplicación de diversas metodologías, muchas de las cuales resultan familiares debido a su aplicación en diversas obras civiles, sin embargo, cuando se trata de túneles, se aplican nuevos estudios y métodos de prueba de los que tal vez nunca se tuvo conciencia.

En etapas de factibilidad e ingeniería básica, deben hacerse una serie de estudios geológicos y geotécnicos.

- 1) Geología del trazado del túnel
- 2) Condiciones de aguas subterráneas
- 3) Sectorización geotécnica
- 4) Geotecnia de portales
- 5) Geotecnia para obras anexas

Para la definición del trazado de un túnel, deben considerarse diversas características geológicas:

- 1) Tipos de roca y sus propiedades
- 2) Orientación de discontinuidades respecto al eje del túnel, influye en la dificultad para la de excavación y sus condiciones de estabilidad
- 3) Condiciones favorables es que discontinuidades manteen hacia el sentido de avance de la excavación
- 4) Presencia de fallas, su orientación y espesor

A lo largo de la historia, la ingeniería de túneles ha tenido un desarrollo bastante largo. Desde sus orígenes, pasando por la minería, el transporte de agua, la ingeniería militar hasta llegar a la ingeniería civil. Mas adelante se describe la metodología de diseño y construcción principal que fue relevante en el estudio preliminar del Túnel Lo Prado N°3.

El Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles (NATM por sus siglas en inglés), es el método revolucionario en la construcción moderna de túneles a fines de los años 50 e inicios de los 60, usado, en esencia hasta el día de hoy.

A continuación, en la Ilustración 1 se observa la metodología elaborada por la Sociedad Austríaca de Geomecánica para el diseño estructural de un túnel:

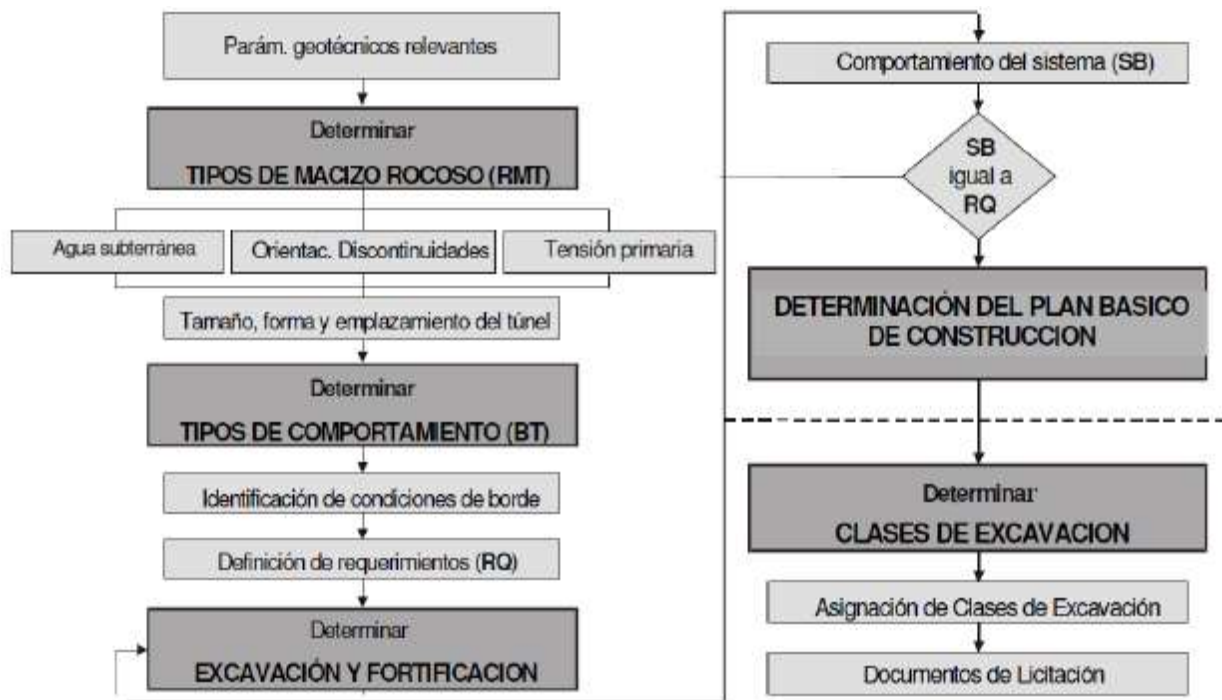


Ilustración 1 - Metodología propuesta por la SAG

Fuente: (Ruiz, 2019)

Como conclusión, la metodología de diseño propuesta, expresada en la Ilustración 1, a diferencia de otros métodos conocidos, tiene más ventajas económicas disponibles al aprovechar la fuerza geológica inherente disponible en la masa rocosa circundante para estabilizar el túnel.

Los elementos esenciales del método son los siguientes:

- Uso de la resistencia del macizo rocoso como elemento estructural. La roca circundante al elemento estructural es el elemento principal de soporte del túnel.
- Uso de Hormigón Proyectado para el sellado y sostenimiento. Con el fin de evitar deformaciones excesivas en los momentos cercanos a la excavación.
- Medición y monitoreo constante de las deformaciones. Con el fin de evitar situaciones no planificadas.
- Al revestimiento inicial se le añade soporte activo, generalmente con elementos como pernos de anclaje, mallas y marcos de acero, dependiendo de la calidad de la roca.
- Cierre rápido de la base del anillo del túnel, con el fin de aprovechar la forma oval del túnel.
- Flexibilidad en el diseño y sus materiales. Entendiendo que el monitoreo en terreno va a entregar datos que pueden ser diferentes al diseño original, por lo que se debe tener en consideración el rediseño en terreno como una manera de ajustar o adecuar el diseño a las condiciones reales encontradas en terreno durante la construcción.
- Clasificación de la calidad del macizo rocoso. Indicadores para medir la calidad de la roca que permita ir definiendo diseños. Estas clasificaciones son motivo de estudio hasta el día de hoy.

En resumen, esta metodología se basa en estos tres aspectos:

- Caracterización del terreno, mediante trabajos de campo complementados con ensayos de laboratorio.
- Definición de las Secciones Tipo, mediante cálculos tenso-deformacionales.
- Control de la estabilidad de la excavación, mediante medidas de convergencia.

(Ruiz, 2019) afirma:

Parte crucial del diseño de un túnel es conocer la calidad y propiedades del macizo rocoso en el sector del trazado de este. Para ello existen diversos métodos y clasificaciones geomecánicas que permiten realizar esta tarea. (p. 11)

Entre las clasificaciones para túneles propuestas hasta el presente, destacan las de:

- Terzaghi (1946)
- Kauffer (1958)
- Deer et al. (1967).
- Bieniawski (1973)
- Barton et. al (1974 – 1993)

En la actualidad y en el proyecto como tal, se aplican los últimos dos índices (Bieniawski y Barton), estos parten de la combinación de algunos de los siguientes parámetros del macizo rocoso:

- Resistencia del material rocoso
- RQD
- Espaciado de discontinuidades
- Orientación de las discontinuidades
- Estructuras geológicas y fallas individualizadas
- Infiltraciones
- Estado tensional
- Condiciones de las discontinuidades:
 - Continuidad
 - Separación
 - Rugosidad
 - Meteorización
 - Relleno

Un sistema de clasificación de macizos rocosos permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros de diseño y de sostenimiento. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa
- Grado de fracturación en términos del RQD
- Espaciamiento de las discontinuidades
- Condiciones de las discontinuidades
- Condiciones hidrogeológicas
- Orientaciones de las discontinuidades respecto a la excavación

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento de la excavación se expresa por medio de un índice de calidad denominado "Rock Mass Rating" (RMR), que varía de 0 a 100.

Para aplicar la clasificación geomecánica RMR se divide el macizo rocoso a lo largo del eje del túnel, en un número de tramos que presenten características geológicas aproximadamente uniformes.

Para obtener el índice RMR se debe identificar en que rango está y que valoración tiene para cada parámetro presente en la Ilustración 3, pero es en la Ilustración 2 donde finalmente se determina la clasificación del macizo y sus características geotécnicas. A continuación, se presenta:

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Valoración	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Ilustración 2 - Clasificación de la calidad de la roca según el índice RMR

Fuente: (Ruiz, 2019)

Al final la Ilustración 2 se correlaciona con la Ilustración 3 para saber con certeza la calidad de la roca, esto tiene importancia en la determinación de parámetros futuros.

Para determinar el rango de valoración de la roca se procede a utilizar la Ilustración 3 en la que se presentan varias situaciones en base al análisis previo del sitio:

N°	Parámetro de clasificación		Rangos de Valoración						
	1	Resistencia de roca sana	Ensaye de carga puntual [MPa]	>10	4-10	2-4	1-2	En valores bajos se prefiere ensayos a compresión uniaxial	
Compresión Simple [MPa]			>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Valoración		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Valoración		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas [m]		>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de las diaclasas		Muy rugosas Discontinuas Sin separaciones Bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 [mm] Bordes duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 [mm] Bordes blandos	Espejos de falla o cono relleno <5 [mm] o abierta 1-5 [mm]. Diaclasas continuas	Relleno blando > 5 [mm] o abertura > 5 [mm] Diaclasas continuas		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 [m] de túnel [l/m]	Nulo	<10	10-25	25-125	>125		
		Relación presión agua tensión principal. Mayor	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado General	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteos	Flujos		
	Valoración		15	10	7	4	0		

Ilustración 3 - Clasificación Geomecánica de Bieniawski

Fuente: (Ruiz, 2019)

En conclusión, la Ilustración 3 da a entender que el rango de valoración tiene una mayor incidencia en el índice de la calidad de la roca (RQD) y viceversa, esta información posteriormente se utiliza para determinar un solo índice que ayuda a definir los parámetros finales del túnel a construir.

Desarrollado en Escandinavia por Barton, Lien y Lunde en 1974, a partir de 200 casos de excavaciones subterráneas, actualizado en 1993 con el respaldo de 1050 casos, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite establecer sistemas de sostenimientos para túneles y cavernas.

El sistema Q está basado en una evaluación numérica de seis parámetros que definen el índice Q. Este índice viene dado por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Ecuación 1 - Índice Q de Barton

Fuente: (Ruiz, 2019)

Donde:

- RQD: índice de la calidad de la roca (Rock Quality Designation en inglés), obtenida de los sondajes.
- J_n : índice de diaclasas que indica la cuantía de la fracturación
- J_r : índice de rugosidad
- J_a : índice de alteración que indica la alteración de las juntas
- J_w : coeficiente reductor por la presencia del agua
- SRF: Stress Reduction Factor, es un coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional en el macizo rocoso

Así, los tres grupos formados con estos parámetros representan:

- RQD/J_n : el tamaño de los bloques
- J_r/J_a : la resistencia al corte entre los bloques
- J_w/SRF : la influencia del estado tensional

El rango de variación entre los parámetros se denota en la Ilustración 4, estos son los rangos más aceptables que permite la metodología:

Parámetro	Rango
RQD	[0 – 100]
Jn	[0.5 – 20]
Jr	[0.5 – 4]
Ja	[0.75 – 20]
Jw	[0.05 – 1]
SRF	[0.5 – 20]

Ilustración 4 - Rango de Variación de Parámetros

Fuente: (Ruiz, 2019)

En conclusión, el rango en el que se encuentran los parámetros que componen la Ecuación 1 y se presentan en la Ilustración 4 son de vital importancia y para su determinación se requieren estudios previos, además sus rangos deben respetarse pues los valores de Q que resulten de la operación determinan la calidad de la roca y de tal manera cuenta como prueba de factibilidad para la elaboración del túnel.

A continuación, se presenta la Ilustración 5 que determina la clasificación de las rocas mediante el índice Q. La valoración de la calidad de la roca queda definida por los siguientes intervalos, el índice Q varía entre 0.001 y 1000.

Clasificación	Valor de Q
Roca excepcionalmente mala	[0.001 – 0.01]
Roca extremadamente mala	[0.01 – 0.1]
Roca muy mala	[0.1 – 1]
Roca mala	[1 – 4]
Roca media	[4 – 10]
Roca buena	[10 – 40]
Roca muy buena	[40 – 100]
Roca extremadamente buena	[100 – 400]
Roca excepcionalmente buena	[400 – 1000]

Ilustración 5 - Clasificación del Índice Q

Fuente: (Ruiz, 2019)

En conclusión, dependiendo del valor Q que de la Ecuación 1 se podrá confirmar la calidad de la roca ensayada, como lo estipula la Ilustración 5, y por consiguiente se podrá determinar el posible comportamiento del terreno y la estructura final que en este caso sería un túnel con revestimiento de concreto.

Existen otras formas de determinar el índice Q teniendo en mano el valor del índice RMR y viceversa, varios de los ingenieros que propusieron la teoría de clasificación de rocas dieron su propia ecuación para determinar uno de los parámetros utilizando uno ya conocido, a continuación, se presenta la ecuación propuesta por Bieniawski en 1979:

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

Ecuación 2 - Correlación entre índices RMR y Q

Fuente: (Ruiz, 2019)

En conclusión, ambos valores se relacionan hasta al punto en el que se puede determinar uno con la ayuda del otro aplicando la Ecuación 2 por medio del logaritmo natural.

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas de suelo y de roca se procede a diseñar de forma geométrica la sección transversal del túnel, ya que este es el tercer túnel que se hace en la zona se adoptan las características geométricas de los primeros dos túneles construidos, con leves alteraciones. En la ilustración 6 se presentan las dimensiones finales:

Parámetro	Dimensión
Gálibo Vertical	5 [m]
Ancho de pistas	3.5 [m]
Berma interior	1.2 [m]
Berma exterior	1.5 [m]
Aceras laterales	1.07 [m]³
Pendiente transversal	2%

Ilustración 6 - Características Túnel Lo Prado N°3

Fuente: (Ruiz, 2019)

En conclusión, ya que las pruebas de suelo y de roca fueron favorables según el autor, al final se optó por usar una variación de las dimensiones estándar de una sección de túnel que brinda el Volumen 3 del Manual de Carreteras de Chile, también por ser la sección transversal que mejor se acopla al actual terreno.

Ruiz (2019) afirma:

La conclusión de este trabajo de título es, que, bajo los supuestos y modelaciones utilizadas, el Proyecto Túnel Lo Prado N°3 tiene varios escenarios donde es rentable socialmente, por lo que se recomienda realizar análisis de prefactibilidad y factibilidad más precisos.

Esto porque en la evaluación se hacen consideraciones importantes que deben ser analizadas cuidadosamente, la primera es la modelación del crecimiento del parque automotriz, esta se estima en base a los datos del IPC y en general, en estos proyectos se modela del 3% al 6% dependiendo del nivel de demanda de la autopista. (p. 115)

3.1.1.2. Procesos constructivos para túneles viales desarrollados en Colombia

El siguiente documento referente al tema de túneles de carretera hace hincapié en los procesos constructivos para túneles viales en Colombia, dando a conocer los estudios preliminares, técnicas de excavación, maquinaria a utilizar y las normativas que se usan en la construcción de túneles en Colombia actualmente. El principal objetivo de esta investigación es:

Realizar una revisión bibliográfica histórica a nivel nacional, con respecto a los avances en tecnología de punta, en los procesos constructivos de calidad, técnicas de última generación y sistemas operacionales viales eficientes en la construcción de túneles viales; que ayuden al país a ser más competitivo, futurista y pueda colocarse a nivel de cualquier país del mundo en la construcción de infraestructura vial, integrando la economía en desarrollo para Colombia. (Pineda, 2016, p. 13)

Previo a discutir acerca los procesos constructivos se hace una breve introducción hacia la geología de Colombia mostrando el siguiente mapa del país que muestra cómo se compone el territorio y la distribución de sus rocas:



Ilustración 7 - Mapa actual de la geología colombiana

Fuente: (Pineda, 2016)

Pineda (2016) menciona que los túneles carreteros se deben diseñar de tal forma que se controlen las posibles fallas en el terreno cumpliendo condiciones de seguridad, eficiencia, facilidad de construcción, vida útil y el mantenimiento de su operación. (p. 43)

Dichos túneles deben de contemplar los siguientes aspectos:

- Evaluar el comportamiento del terreno frente a las características y condiciones específicas del proyecto que influyen la excavación.
- Cumplir con los requerimientos socio ambientales (ruido y vibración), interrupción del tráfico, contaminación o cambios de la calidad del agua, subsidencia, levantamiento del terreno, efectos sobre estructuras vecinas, efectos producidos en el paisaje circundante, flora, fauna y alrededores, disposición de materiales producto de excavación y de procesos constructivos.
- Evaluación de la actividad sísmica
- Efectos de presión de agua interna y externa, nivel freático y cantidad de infiltraciones de agua.

Colombia al igual que muchos otros países que han venido desarrollando una gran experiencia adquirida a través de la historia en muchos proyectos de obras subterráneas, tienen que cumplir algunas normas y parámetros mínimos establecidos por normatividades de la actualidad. Las normativas aplicadas en Colombia son las siguientes:

- La normativa española IOS"98
- Normatividad (PIARC) (Asociación Internacional Permanente del Congreso de Carreteras)

En la parte de estudios geológicos y geotécnicos se aplicó la misma metodología que se puede apreciar desde las Ilustraciones 1 hasta la 5 tomando en cuenta que se tienen todos los datos geológicos de las zonas colombianas en las que cuales se han construido y se quieren seguir implementando túneles.

El método N.A.T.M. fundamentalmente consiste en integrar la roca o suelo alrededor del túnel en forma circular, y permite utilizar un soporte flexible para mejorar la capacidad de auto soporte del terreno ejecutando la obra en forma secuencial. (Pineda, 2016)

Por otra parte, el material de la excavación del túnel es seleccionado y reutilizado para el tratamiento y manejo especial de los taludes, así como el mantenimiento permanente de la misma.

Los sistemas de excavación en terrenos duros fueron con perforación y voladura controlada en dos etapas: bóveda y banca; para terrenos blandos con métodos mecánicos en tres etapas: bóveda, banca y solera.

A continuación, se presenta un ejemplo del producto final de la excavación utilizando métodos mecánicos demostrando las tres etapas anteriormente dichas:

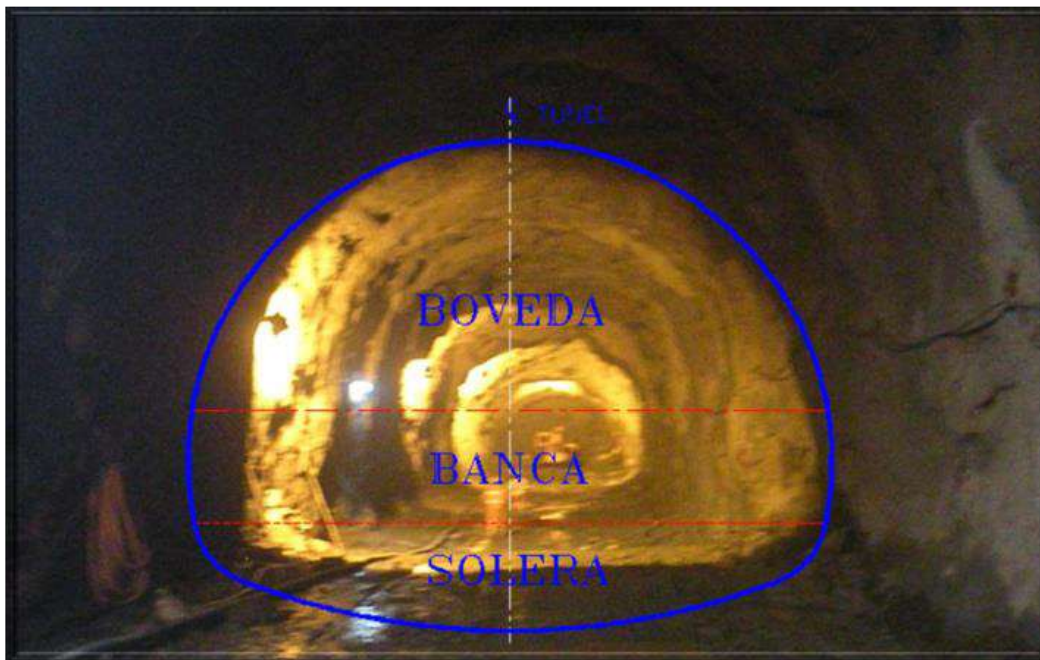


Ilustración 8 - Esquema del túnel Segundo Centenario

Fuente: (Pineda, 2016)

En la ilustración anterior se muestra el trabajo terminado cuando se termina optando por el uso de una tuneladora o TBM para excavar en terrenos duros o blandos.

Se concluye cumpliendo con el objetivo final de la monografía que fue el de contribuir al conocimiento sobre la construcción de túneles viales en Colombia, considerando la geología, evolución y avances tecnológicos. Se recomienda actualizar la información cada que surja un nuevo proceso constructivo entre los que ya se conocen hasta el momento.

3.1.1.3. Proyecto de ejecución de túnel carretero en Oyón, Perú

El siguiente proyecto trata sobre un diseño realizado en la provincia de Oyón, en el límite provincial con la provincia de Huaura y próximo al pueblo de Churin, a unos 200 km de la capital de Perú, Lima. Este proyecto se hizo con el fin de crear un tramo de túnel carretero de doble sentido que atravesaría desde una ubicación cercana al pueblo de Churin, junto al río Huaura, y otro túnel ubicado más al sur junto a la presa de Cheven, junto al río Checras.

Gil (2017) afirma: “Las características geológicas son las bases fundamentales para todo trabajo de construcción, en especial para toda obra de carácter subterráneo. Por ello hay que analizar las características del suelo y la roca en la cual vamos a trabajar” (p. 6).

Para realizar dicho proyecto fue necesario llevar a cabo un análisis geológico, se utilizaron datos de sondeos realizados en las proximidades, también se tomó información derivada de la construcción de un túnel hidráulico que se utiliza para conectar el embalse del río Huaura.

A continuación, se muestra un mapa geológico de la zona que se analizó para poder tener una noción de las características del terreno previo al diseño del túnel:

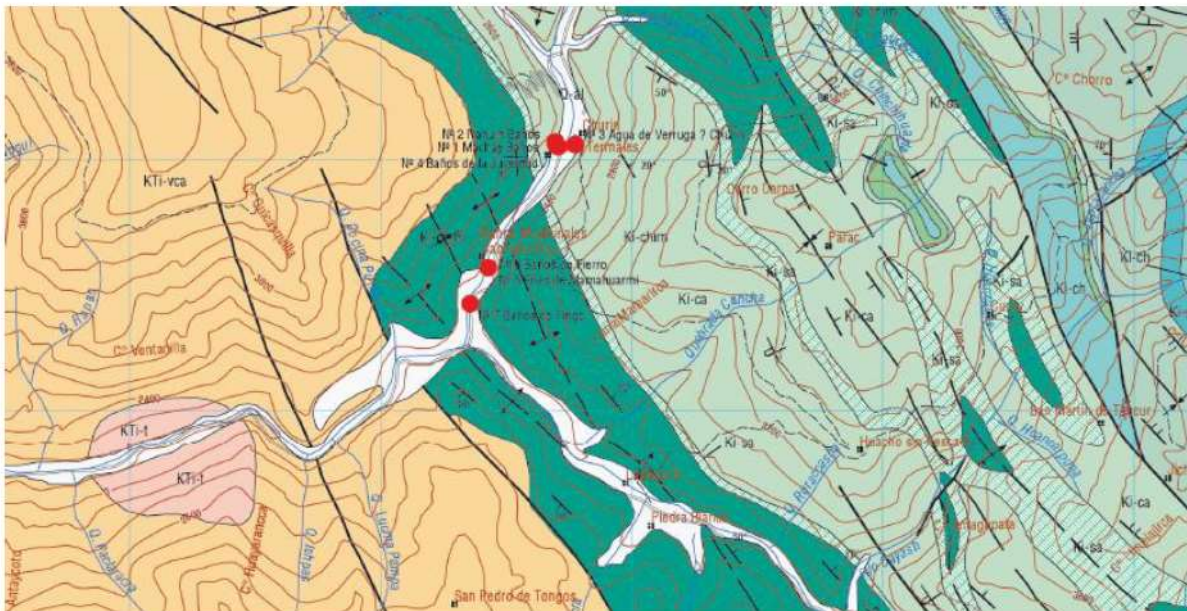


Ilustración 9 - Mapa geológico de la zona

Fuente: (Gil, 2017)

Para la clasificación de rocas se utilizaron los parámetros, ecuaciones y tablas que se pueden apreciar en las Ilustraciones 1 hasta la 5, y las Ecuaciones 1 y 2, para la determinación de los índices RMR, RQD y Q; estos estudios se hacen bajo supervisión y en laboratorios, tomando muestras de la zona en los puntos acordados.

Con lo que respecta al proyecto, se estimó que la roca tiene una resistencia promedio de 135 MPa. También se determinó la calidad de la roca (RQD) que acordó ser de un 75% en base a las observaciones hechas por medio de las muestras. Analizando profundamente las muestras, se determinaron los demás coeficientes que junto con el RQD ayudan a determinar el valor final absoluto del índice Q de Barton. El RMR se determinó usando la Ecuación 2 que correlaciona el índice Q de Barton.

En base a proyectos hechos en terrenos con características similares se optó por utilizar la sección transversal que se muestra a continuación en la Ilustración 8:

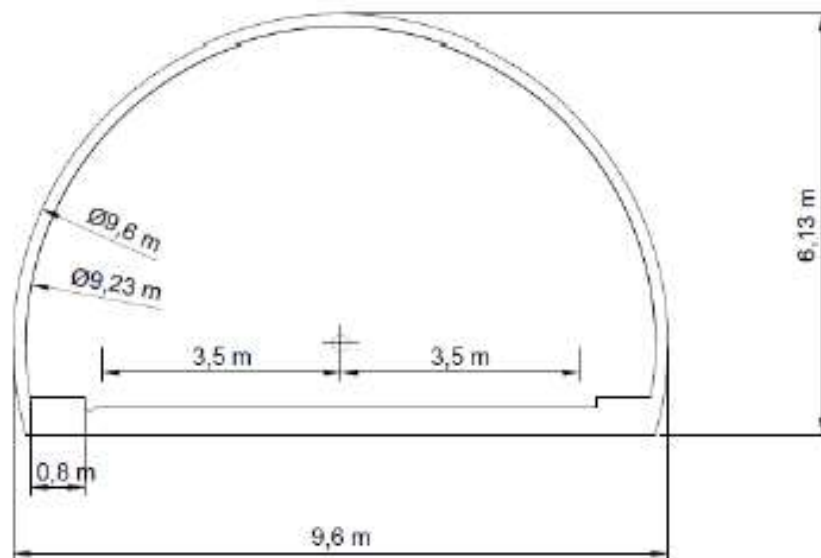


Ilustración 10 - Sección transversal del túnel

Fuente: (Gil, 2017)

Se concluyó que se iba a optar por un diseño circular para la sección del túnel, ya que su uso ha dado buenos resultados en obras similares, dicha sección puede variar ligeramente dependiendo de la inclinación, pero en su geometría no se muestran cambios abruptos.

Debido a que se quiso ahorrar tanto en términos de tiempo como en dinero, se optó por un método de excavación para suelos blandos, este siendo el método de perforación y voladura respectivamente. Este método se utilizó tanto para la excavación del túnel principal como para la excavación de las vías de evacuación.

La normativa que se empleó para el desarrollo del túnel fue la española IOS"98, en lo que respecta a normas de excavación y de seguridad se emplearon otras.

Para concluir, el proyecto constaba de varias etapas, debido a que no solo era un proyecto de diseño, también tenía como apartado un estudio económico para determinar la factibilidad del proyecto como tal y ver si era el diseño más óptimo para la zona. Es por eso que muchas de las decisiones que se tomaron al final se basaron en el factor económico y en el factor tiempo en cada de una de sus etapas que correspondieron al diseño, excavación, perforación y construcción.

3.1.2. ANÁLISIS DEL MICROENTORNO

En este apartado se mostrarán proyectos desarrollados internamente en el país sin tomar en cuenta San Pedro Sula que es el foco de la investigación. Estos hacen referencia a elementos que pueden ser de vital importancia para el desarrollo del presente documento.

3.1.2.1. Construcción del túnel en el bulevar La Hacienda, Tegucigalpa

Actualmente la metodología de construcción de túneles carreteros se ha aplicado exclusivamente en las ciudades mejor desarrolladas del país, siendo estas San Pedro Sula, que es considerada la capital industrial, y Tegucigalpa, que es considerada la capital política.

Tegucigalpa cuenta con la mayor cantidad de túneles carreteros implementados en el país hasta la fecha, siendo uno de los más recientes el que se encuentra en el bulevar La Hacienda conectando con el bulevar San Juan Bosco, este inicio su construcción a principios del año 2019, respectivamente. Según las proyecciones de la Alcaldía Municipal del Distrito Central (AMDC), la obra debió de haber concluido 10 meses después de iniciada su construcción, es decir, hasta principios del 2020. (La Tribuna, 2019)

Sin embargo, surgió el imprevisto de la pandemia por COVID-19 en el primer trimestre del año 2020 lo cual retraso la obra que estaba valorada en 80 millones de lempiras respectivamente y se tenía planeado también la construcción de un puente elevado de lo cual no se tiene información hasta el momento.

El túnel pretende mejorar la circulación de los vehículos que transitan en esa zona, tanto en dirección al bulevar Suyapa, al sector de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) y hacia la Villa Olímpica, como en sentido contrario al bulevar San Juan Bosco. (La Tribuna, 2019)

La obra finalizo en el primer trimestre del año 2021, un año más de lo esperado, y se habilito estando sus etapas finales. La obra cuenta con dos carriles que miden 7 metros con 30 centímetros de ancho para los automotores, además de dos trochas de 3 metros con 65 centímetros. Asimismo, el túnel se compone de una caja central de 20 metros de longitud y dos rampas con 70 metros de largo que sirven de acceso a las diferentes vías sobre la obra.

De dicho túnel no se tiene más información, lo único de lo que se tiene dato es su ubicación, presupuesto y a quienes beneficia, pero en lo que respecta a procesos constructivos, normativas y estudios realizados eso es de carácter privado.

En la siguiente ilustración se muestra un modelo 3D de cómo se vería la obra ubicada entre los bulevares San Juan Bosco y La Hacienda una vez terminada:



Ilustración 11 - Modelo 3D del túnel vehicular

Fuente: (La Tribuna, 2019)

3.1.2.2. Construcción del túnel de la colonia La Reforma, Tegucigalpa

A inicios del 2021, específicamente en enero, fue habilitado de manera parcial y temporal el túnel que se construyó en la entrada a la colonia La Reforma en la Avenida La Paz, del bulevar Los Proceres, Tegucigalpa, con el fin de probar su funcionalidad previo a su apertura total en febrero.

Este es uno de los tantos proyectos viales que se vio atrasado debido a la pandemia mundial por COVID-19 que hizo que se retrasara exactamente un año, la obra inicio en 2019 y se tenía prevista su finalización a principios del 2020.

Con este proyecto se pretende aliviar el congestionamiento vial que se forma en la zona, sobre todo en dirección al centro de la ciudad. Esta obra ha experimentado varias modificaciones, pues una de las primeras opciones que planteaban las autoridades de la ciudad fue la construcción de un paso elevado, sin embargo, por las condiciones de la zona se optó por un paso subterráneo. (El Herald, 2021)

Además del túnel se tuvieron que instalar tuberías de aguas lluvia para cumplir con la parte del drenaje subterráneo, este fue uno de los trabajos más extensos según los obreros. Al igual que los otros túneles implementados en la capital, no se tiene información alguna acerca de la normativa o metodología utilizada para el desarrollo del mismo ya que esta es información privada, pero es innegable que se tuvo que aplicar una normativa para llevar a cabo el diseño geométrico y estructural del túnel.

La longitud del túnel es de 235 metros lineales, desde la entrada hasta la salida en sus rampas, con 10.30 metros de ancho para dar cabida a tres carriles de 3.30 metros. La solución vial propuesta además incluye el acondicionamiento de una bahía para buses, ubicada a nivel de piso en el costado izquierdo del túnel.

El túnel se habilito en su totalidad en febrero del 2021 y a mediados del mismo año ya se tenían planeadas más obras viales que se anexarían a este túnel como complemento, entre ellos un paso vial que se tiene planificada su culminación en un promedio de dos meses.

3.1.2.3. Construcción del túnel en el bulevar Suyapa, Tegucigalpa

En el año 2019 la Alcaldía Municipal del Distrito Central llevo a cabo la licitación de un nuevo proyecto de infraestructura que serviría como solución vial para un promedio de 36 mil conductores que a diario utilizan el bulevar Suyapa.

Se trato de un túnel vehicular con un aproximado de 160 metros de largo y 5 metros de ancho, que fue construido con fondos municipales en el bulevar Suyapa y la intersección con la calle Orense hacia la colonia Miramontes y bulevar 14 de noviembre, en las inmediaciones de Supermercados La Colonia No. 1. (Ramírez, 2019)

La obra incluyo la construcción de un ramal directo desde el bulevar 14 de noviembre, que comunica la calle La Salud con el bulevar Suyapa en sentido a la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), con una longitud de 115 metros y una rampa de ascenso. (Ramírez, 2019)

Estas obras están valoradas en 59 millones de lempiras y terminaron siendo de las muchas obras que tuvieron que extender su fecha de finalización debido a la pandemia mundial por COVID-19, finalizando e iniciando operaciones en septiembre del 2021, un año más de lo previsto.

A continuación, se muestra una vista en planta de la zona que determina la funcionalidad del túnel en combinación con el puente aéreo:



Ilustración 12 - Ubicación y uso previsto del túnel

Fuente: (El Heraldo, 2021)

Tal como se puede apreciar en la Ilustración 12, el túnel es unidireccional y solo se puede acceder desde la calle Orense por la colonia Miramontes para virar a la izquierda en el bulevar Suyapa llevando al conductor hasta el Hospital Escuela pasando por el desnivel que está encima del bulevar 14 de noviembre.

Esta nueva obra pretende disminuir los tiempos de viaje y la tasa de accidentes viales, así como reducir los costos de operación de los vehículos, y aumentar el nivel de seguridad vial en los peatones, con el propósito fundamental de mejorar la calidad de vida de los habitantes del sector.

Nuevamente, no hay información pública acerca de las normativas y metodologías utilizadas para llevar a cabo el diseño geométrico y estructural de este túnel o de cualquier otro túnel u obras subterránea que se aplicó en Tegucigalpa; por otra parte, se entiende que, en base a la experiencia de los ingenieros civiles de la zona, la normativa más común a utilizar en esto tipo de obras es la normativa estadounidense AASHTO sin embargo esa es solo una suposición.

3.1.3. ANÁLISIS INTERNO

El análisis interno menciona todos aquellos documentos o proyectos realizados en el entorno en el que la investigación se llevara a cabo, en este caso, la ciudad de San Pedro Sula.

3.1.3.1. Construcción del túnel entre la 27 y 28 calle del bulevar del sur, SPS

Posterior a la licitación y adjudicación de la obra, a inicios del año 2017 se llevó a cabo la construcción de los túneles subterráneos en la 27 y 28 calle, en el bulevar del sur, frente al Hospital CEMESA, en la CA-5 de San Pedro Sula. Hasta la fecha, San Pedro Sula cuenta con el primer túnel carretero implementado en toda la nación y ha servido de referencia para muchos otros proyectos de obras subterráneas como los que se pueden apreciar en Tegucigalpa, la capital del país.

El túnel de la 27 calle consta de 32 metros de largo, mientras que las aproximaciones de los accesos alcanzan medidas de 84 metros y las salidas de 78 metros, haciendo una longitud total de 194 metros respectivamente. (El País, 2018)

El alcalde de San Pedro Sula, Armando Calidonio, detalló que la pavimentación del túnel se hizo con concreto hidráulico, sin embargo, no se mencionó la normativa o metodología con la cual se diseñó el túnel, aunque en base a las recomendaciones y experiencias de varios ingenieros civiles que residen en San Pedro Sula se puede intuir que se utilizó la normativa AASHTO. Cabe recalcar que este proyecto se hizo con fondos municipales y fue supervisado en casi toda su etapa constructiva por el alcalde de San Pedro Sula, Armando Calidonio.

El túnel tuvo su apertura en el primer trimestre del 2018, y hasta la fecha ha logrado beneficiar a más de 50 mil conductores cuyo tránsito es más fluido y no hay riesgo de accidentes. La moderna vía fue estrenada ante la presencia de Armando Calidonio. Se recomienda que en dicho túnel se transite a una velocidad máxima de 15 kilómetros por hora, ya que el túnel es unidireccional y tiene altura de entrada de aproximadamente 5 metros.

A continuación, se muestra una modelo 3D de la zona en la que está ubicada el túnel actualmente, esta imagen fue utilizada para promocionar la idea preliminar del túnel:



Ilustración 13 - Modelo 3D del túnel ubicado en el bulevar

Fuente: (Calidonio, 2016)

En la Ilustración 13 se logra entender el cambio que traería la implementación de este túnel en una zona altamente transitada las 24 horas del día y hasta la fecha dicho túnel ha logrado dar resultados muy positivos en cuanto a funcionalidad.

3.1.3.2. Construcción del túnel en el centro comercial "City Mall", SPS

Esta obra alterna se construyó con el fin de que el tráfico vehicular no sufriera congestionamientos en la circunvalación una vez el moderno centro comercial fuera puesto en funcionamiento, el City Mall se inauguró en noviembre del año 2005.

Laura María Blanco, directora ejecutiva de la división inmobiliaria de la corporación Lady Lee, propietaria del City Mall, señala que a raíz de la construcción del centro comercial se previó un aumento considerable del tráfico de vehículos en el área de circunvalación cercana al moderno centro comercial, en puntos específicos donde la circulación ya es un problema por la existencia de otros edificios grandes con bastante tráfico de gente.

Por lo anterior, se vieron en la necesidad de construir entradas y salidas alternas al centro comercial para no influir negativamente en el tránsito, a través de este túnel.

Con los planos del túnel listos y aprobados todos los permisos de construcción, la ejecutiva señaló que los trabajos irían según lo planificado y la obra estaría terminada el 30 de octubre del 2005.

Subrayo que esta obra no haría más estrecha la Avenida Circunvalación en el tramo frente al City Mall, ya que se emplearía el área de la mediana, la cual terminaría desapareciendo.

De esta forma los conductores que circulan por la Circunvalación con dirección hacia la Fuente Luminosa pueden acceder al túnel a través del nuevo carril en la mediana, que los conducirá subterráneamente hasta al estacionamiento uno del City Mall.

De igual forma, al salir del centro comercial, el conductor entrará al túnel de salida que lo conducirá nuevamente hacia el carril que sube por la Cámara de Comercio.

La construcción del túnel estuvo a cargo de la empresa hondureño-guatemalteca COPRECA, la cual ha construido túneles y pasos a desnivel en toda Centroamérica. Es una estructura sumamente robusta y segura que fue supervisada por la empresa Consultores En Ingeniería, S. A. De C. V. (CINSA) de Tegucigalpa.

3.1.3.3. Zonificación de Suelos de la ciudad de San Pedro Sula, Cortés

El estudio de suelos desempeña un papel fundamental en toda obra de construcción civil ya que toda estructura dependerá del tipo de suelo sobre el cual este cimentado. Conocer el suelo sobre el cual se edifica ofrece una serie de ventajas que hacen más eficientes los procesos de diseño, presupuestos y construcción de obras.

En el presente informe se da a conocer la investigación realizada con el propósito de elaborar un mapa que muestre los diferentes tipos de suelos presentes en la ciudad de San Pedro Sula, según la clasificación SUCS con la finalidad de contribuir a los interesados en materia de construcción siendo evidente e indispensable contar con un recurso como este.

Los resultados y conclusiones que se presentan a continuación, son producto de la realización de las pruebas de laboratorio necesarias para poder clasificar los suelos por medio del método del **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**.

El proyecto fue dividido en cuatro fases, una por cada zona que se pretendió analizar de la ciudad y cada zona fue dividida en cuadrantes y sub-cuadrante. Cada cuadrante consta de 9 km² y cada sub-cuadrante consta de 1 km² respectivamente. En la siguiente ilustración se puede apreciar mejor la ubicación de cada uno de estos cuadrantes:

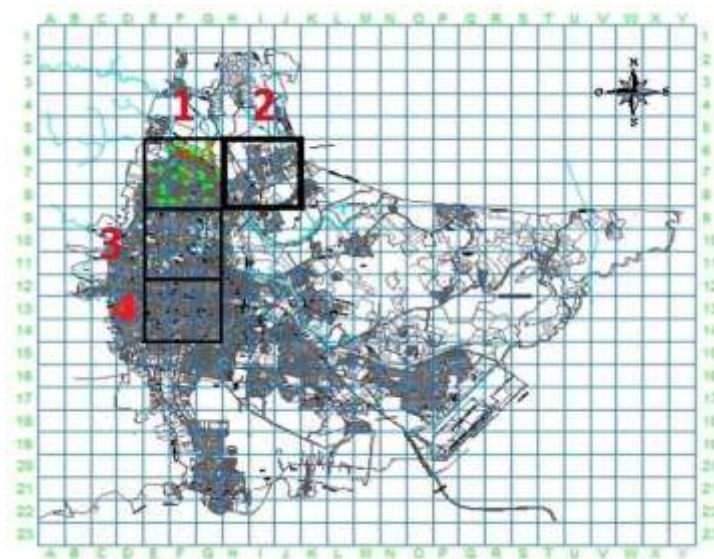


Ilustración 14 – Mapa de los cuadrantes estudiados, San Pedro Sula

Fuente: (C. Caballero et al., 2014)

Como se pudo apreciar en la Ilustración 14, solamente se pudo cubrir hasta cierta parte de la ciudad, específicamente el centro de la metrópolis y cabe agregar que este es el único estudio de zonificación de suelos que UNITEC posee hasta la actualidad y que funge como referencia para otros proyectos de graduación.

En lo que recae a la clasificación de suelos, a continuación, se presenta la tabla de resultados obtenidos mediante los sondeos hechos en el primer cuadrante, correspondiente a la fase uno, haciendo referencia a la zona noroeste de la ciudad de San Pedro Sula:

# Sondeo	Ubicación	Clasificación SUCS	Descripción
S1	Cruce entre Boulevard Mackey y Armenta	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S2	Altara	SP	Arena mal graduada
S3	Villas Mackey	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S4	Los Alamos #1	SM	Arena limosa
S5	Rio Blanco	SP	Arena mal graduada
S6	Lomas del Pedregal	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S7	Colvisula	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S8	La Tara	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S9	Puente La Morgue	SW-SM	Arena bien graduada con limo
S10	Los Alpes	SM	Arena limosa
S11	Boulevard Los Alpes	SM	Arena limosa
S12	Casa Maya II #1	SW	Arena bien graduada
S13	Los Alamos #2	SM	Arena limosa
S14	Los Alamos #3	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S15	Detras de parque Villas Mackey	SM	Arena limosa
S16	Casa Maya II #2	SM	Arena limosa
S17	La Foresta #1	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S18	La Foresta #2	SM	Arena limosa
S19	Boulevard Mackey	SM	Arena limosa
S20	Sitraunah	SM	Arena limosa

Ilustración 15 – Clasificación SUCS del Cuadrante #1 (Noroeste)

Fuente: (C. Caballero et al., 2014)

Al estar más cerca de los ríos y de los acuíferos de la ciudad, los suelos de la zona noroeste constan en su totalidad de arena, como se puede apreciar en la Ilustración 15, se hicieron 20 sondeos y se encontraron en su mayoría arenas con presencia de limo a 1 metro de profundidad.

A continuación, se presenta la tabla de resultados obtenidos mediante los sondeos hechos en el segundo cuadrante, correspondiente a la fase dos, haciendo referencia a la zona noreste de la ciudad de San Pedro Sula:

CALICATAS	UBICACIÓN	UTM	SUCS	DESCRIPCION
S1	Col. Fesitrahñ	N 1720922 E 392952	SM	Arena limosa
S2	Col. Fesitrahñ	N 1720545 E 393530	SM	Arena limosa
S3	Col. Fesitrahñ	N 1721055 E 393615	SP-SM	Arena mal graduada con
S4	Col. Fesitrahñ	N 1720951 E 394169	SW-SM	Arena bien graduada con
S5	Col. Fesitrahñ	N 1720201 E 393748	SP-SM	Arena mal graduada con
S6	Col. Las Mercedes	N 1719823 E 392988	SP-SM	Arena mal graduada con
S7	Col. Santa Monica	N 1720582 E 392582	SP-SM	Arena mal graduada con
S8	Col. Santa Monica	N 1721271 E 392546	SM	Arena limosa
S9	Col. Santa Monica	N 1720249 E 392725	SM	Arena limosa
S10	El Zapotal	N 1721498 E 391485	SP-SM	Arena mal graduada con
S11	El Zapotal	N 1721026 E 391753	SM	Arena limosa
S12	El Zapotal	N 1720232 E 392168	SM	Arena limosa

CALICATAS	UBICACIÓN	UTM	SUCS	DESCRIPCION
S13	Rio Blanco	N 1719500 E 392037	SM	Arena limosa
S14	Rio Blanco	N 1710919 E 392011	SM	Arena limosa
S15	UNITEC	N 1720271 E 393133	SM	Arena limosa
S16	Col. Los Robles	N 1718580 E 391814	SP	Arena mal graduada
S17	Bordo Rio Blanco aguas	N 1718898 E 392106	SM	Arena limosa
S18	Bulevar del Norte	N 1719328 E 392158	SP	Arena mal graduada
S19	2do anillo	N 1718644 E 392913	SM	Arena limosa
S20	Bulevar del Norte (desvio)	N 1719771 E 393082	SP-SM	Arena mal graduada con
S21	Cancha Rancho Tara	N 1719882 E 393478	SM	Arena limosa
S22	Res. Villas del Bosque	N 1718723 E 394517	SW	Arena bien graduada
S23	Calle hacia Campisa	N 1719385 E 394139	GW	Grava bien graduada
S24	Colindancia Juan Ramon	N 1719978 E 393873	SW	Arena bien graduada
S25	Bulevar del Norte (peaje)	N 1720351 E 394182	SM	Arena limosa

Ilustración 16 – Clasificación SUCS del Cuadrante #2 (Noreste)

Fuente: (C. Caballero et al., 2014)

Nuevamente, al estar más cerca de los ríos, los suelos de la zona noreste constan en su totalidad de arena, como se puede apreciar en la Ilustración 16, se hicieron 25 sondeos y se encontraron en su mayoría arenas con presencia de limo a 1 metro de profundidad. Se tomaron puntos de referencia muy conocidos por la población sampedrana.

En la fase tres del estudio, se logró determinar el tipo de suelo existente en cada uno de los sondeos ubicados en la zona noroeste de la ciudad.

La zona de estudio que abarca esta investigación en su fase tres, contempla siempre el sector noroeste de la ciudad abarcando colonias como: La Colonia Bográn, Los Alpes, Jardines del Valle, Villas del Sol, Colonia Las Brisas, Colonia Villa Florencia, Avenida Junior, Colonia Buenos Aires, El Palenque entre otras.

De las pruebas realizadas a los 25 sondeos en los diferentes cuadrantes se obtuvieron las siguientes caracterizaciones (en base a la clasificación SUCS):

- Del tipo **SM** (Arena Limosa) se encontró presente en **siete** sondeos.
- Del tipo **SP-SM** (Arena Mal Graduada con Limo) se encontró presente en **diez** sondeos.
- Del tipo **SP** (Arena Mal Graduada) se encontró presente en **dos** sondeos.
- Del tipo **SW-SM** (Arena Bien Graduada con Limo) se encontró presente en **tres** sondeos.
- Del tipo **SW** (Arena Bien Graduada) se encontró presente en **tres** sondeos.

En la fase cuatro del estudio, se logró determinar el tipo de suelo existente en cada uno de los sondeos ubicados en la zona suroeste de la ciudad.

La zona de estudio que abarca esta investigación en su fase cuatro, contempla siempre el sector suroeste de la ciudad abarcando colonias como: Barrio Paz Barahona, Barrio Barandillas, Sector Suncery, Col. Altamira y Trejo, Barrio Los Andes, Barrio Guamilito, Barrio Santa Ana, y parte del Centro de San Pedro Sula.

De las pruebas realizadas a los 25 sondeos en los diferentes cuadrantes se obtuvieron las siguientes caracterizaciones (en base a la clasificación SUCS):

- Del tipo **SM** (Arena Limosa) se encontró presente en **dos** sondeos.
- Del tipo **SP-SM** (Arena Mal Graduada con Limo) se encontró presente en **ocho** sondeos.
- Del tipo **SP** (Arena Mal Graduada) se encontró presente en **seis** sondeos.
- Del tipo **SW-SM** (Arena Bien Graduada con Limo) se encontró presente en **tres** sondeos.
- Del tipo **SW** (Arena Bien Graduada) se encontró presente en **seis** sondeos.

3.2. TEORIA DE SUSTENTO

A continuación, se presenta la teoría de sustento, la cual contiene toda la documentación, normas, requerimientos, ecuaciones, etc. que se requieren para el desarrollo de la investigación y por consiguiente la creación del manual. Conteniendo así normas para el diseño geométrico y estructural, proveniente de manuales o guías existentes que favorezcan la toma correcta de información, el análisis de resultados y el desarrollo de la propuesta o entregable final. La teoría de sustento está compuesta de dos elementos, los objetivos que la misma busca cumplir y un resumen del contenido de relevancia que generan dichos documentos para la investigación. De la misma manera se pretende presentar apartados como ser: alcance, ventajas y limitaciones. Donde el alcance es el producto de todo aquello que se puede lograr al combinar estas teorías, las ventajas que se presentaran al utilizarlas como un solo elemento y las limitaciones o aquello que no se pueda lograr a lo largo del desarrollo del manual. Siendo esta la forma en que se determina en su totalidad la información que le brindará soporte al manual, a sabiendas de sus puntos fuertes (ventajas) y puntos débiles (limitaciones).

3.2.1. MANUAL DE CARRETERAS – TOMO 3 INSTRUCCIONES DE DISEÑO

Toda la información que a continuación se presenta proviene del “MANUAL DE CARRETERAS – TOMO 3 INSTRUCCIONES DE DISEÑO” que pertenece a la Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda (SOPTRAVI) ubicado en Honduras.

El presente documento es el tercer volumen en una serie de ocho manuales dedicados al diseño, construcción y mantenimiento de las carreteras hondureñas y sus estructuras complementarias, el principal objetivo de este documento es fingir como normativa nacional, y está compuesto por tres capítulos que corresponden a los elementos de diseño, información acerca del tránsito y el señalamiento e iluminación necesaria para operar.

En cuanto a la teoría que abarca el manual con respecto al diseño geométrico de las carreteras hondureñas se presenta en el capítulo 1 del documento respectivamente, y contiene la siguiente información:

1) Alineamiento Horizontal

El manual brinda sus propias recomendaciones en cuanto a los radios mínimos y los peraltes a aplicar en base a la velocidad de diseño en la sección de alineamiento horizontal que corresponde al “diseño geométrico en planta”, estos parámetros se pueden apreciar en la siguiente Ilustración:

RADIO MÍNIMO (m)								
Velocidad (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100
Fricción Lateral	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15	0.14	13	0.13
Peralte								
2.00%	35	66	109	166.66	226.84	314.8	425	524.67
3.00%	34	63	104	157.4	214.24	296.28	398.4	491.88
4.00%	32	60	98	149.12	202.96	279.82	375	462.94
5.00%	31	57	94	141.66	192.82	265.09	354.2	437.22
6.00%	30	55	89	134.91	183.63	251.84	335.5	414.21
7.00%	28	52	86	128.78	175.29	239.85	318.7	393.5
8.00%	27	50	82	123.18	167.67	228.95	303.6	374.76
9.00%	26	48	79	118.05	160.68	218.99	289.8	357.73
10.00%	25	47	76	113.33	154.25	209.87	277.2	342.17

Tabla 3-I-6 Radios mínimos absolutos

PERALTE MÁXIMO	0.04	0.06	0.08	0.1
VELOCIDAD DIRECTRIZ km/h	<u>RADIOS</u>			
30	400	500	500	500
40	700	800	800	800
50	1000	1000	1200	1200
60	1300	1400	1500	1500
70	2000	2000	2000	2000
80	2500	2500	2500	2500
90	3000	3000	3000	3000
100	5000	5000	5000	5000

Ilustración 17 - Radios mínimos absolutos

Fuente: (SOPTRAVI, 1996)

Con los radios mínimos determinados precedentemente y para vehículos marchando a la velocidad directriz, la fricción que se utiliza, corresponde a los valores máximos adoptados como los que se logran apreciar en la Ilustración 17.

Radios deseables son aquellos que cumplen simultáneamente las condiciones de los siguientes criterios:

- La fricción utilizada para vehículos marchando a la velocidad directriz, corresponda a coeficientes menores que la mitad de los máximos.
- Durante la noche permitan iluminar suficientemente a los objetos colocados en el camino, a una distancia igual a la de frenado.

La siguiente Ilustración indica el ancho de calzada para dos carriles en función de la velocidad, aunque hoy en día estos anchos se consideran estándar para los tipos de carretera de los que se compone el país, esto independientemente de la velocidad directriz.

Velocidad Directriz km/h	Ancho de Calzada			
	Carretera Especial	Carretera Principal	Carretera Secundaria	Camino Vecinal
entre 60 y 80	7.30 m			
entre 50 y 80		7.30 m		
entre 40 y 60			6.50 m	
entre 30 y 50				5.50 m

Ilustración 18 - Ancho de calzada según el tipo de carretera

Fuente: (SOPTRAVI, 1996)

El ancho de calzada más utilizado y el que es considerado el más óptimo en la actualidad es el de 7.30 m que corresponde a la carretera especial y principal como se muestra en la Ilustración 18.

2) Alineamiento Vertical

La topografía del terreno influye en el alineamiento horizontal de alguna manera secundaria, sin embargo, en el alineamiento vertical la conformación del terreno es un factor importante que interviene en la definición de la rasante.

a) Pendientes máximas

No es práctico limitar o fijar las pendientes máximas de las rasantes, ya que las condiciones topográficas son las que, en la mayoría de los casos, definen la pendiente máxima; sin embargo, es conveniente dar una guía que sugiera las pendientes máximas de diseño. Para una velocidad directriz de 100 km/h, que corresponde a una carretera especial en terreno llano, la máxima pendiente debería ser más o menos 5%.

Para velocidades de diseño de 80 km/h, que corresponde a una carretera especial en terreno ondulado y a una carretera principal en terreno llano, la pendiente máxima de la rasante debería estar entre el 5% al 7%. Para una velocidad directriz de 50 km/h que corresponde a una carretera principal en terreno montañoso, una carretera secundaria en terreno ondulado y un camino vecinal en zona llana, la pendiente máxima debería fluctuar entre el 7% y 12%.

Para velocidades directrices menores a 50 km/h, particularmente para caminos vecinales, de penetración en terreno montañoso, la gradiente máxima deberá ser definida de acuerdo a las exigencias y necesidades del proyecto y al juicio del proyectista.

b) Curvas verticales

Las curvas verticales deben ofrecer seguridad por medio de una adecuada visibilidad, deben ofrecer confortabilidad para los conductores y pasajeros de los vehículos, deben tener un buen sistema de drenaje y estéticamente deben ser presentables.

A continuación, se muestran los factores de K recomendables en base a la velocidad de diseño, con este factor de K se puede calcular la longitud mínima correcta que debe de tener la curva vertical si en algún caso es convexa:

Velocidad directriz km/h	Factor K calculado		Factor K redondeado	
	Mínimo absoluto	Mínimo recomendable	Mínimo absoluto	Mínimo recomendable
30	2.183	2.183	2	2
40	4.880	4.880	5	5
50	8.155	9.762	8	10
60	13.665	17.716	14	18
70	21.964	30.388	22	30
80	31.551	48.238	32	48
90	42.673	70.528	43	71
100	61.090	104.225	61	104

Ilustración 19 - Valores del factor K para curvas convexas

Fuente: (SOPTRAVI, 1996)

Cabe recalcar que, con respecto a las curvas verticales cóncavas, los factores de K difieren cuando la velocidad de diseño es mayor, lo que la diferencia de los valores expuestos en la Ilustración 19 siendo estos factores duplicados pasando la velocidad de 50 km/h.

En la siguiente Ilustración se resume de manera ordenada los parámetros de diseño geométrico a tomar en cuenta al momento de llevar a cabo el diseño de una carretera en suelo hondureño:

Clasificación de la carretera	Características			Topografía	Velocidad directa z km/h	Pendiente máximo %	Pendientes máximas y longitudes correspondientes en recta			Distancia mínima de visibilidad (m)		Anchos de coronamiento (m)				Taludes de relleno según altura (m)				
	Volumen de tránsito Vehículos diarios	Control de acceso	Número de carriles				Valores deseables			Para detención en bajada	Para detención en subida	Carril	Hombro	Mediana	Total	Radio mínimo abt. d. (m)				
							Pendiente %	Longitud m	Pendiente máxima %							Sin barrera		Con barrera		
																0 a 1.50	1.50 a 3.00	3.00 a 5.00	Mayor de 5.00	
Especiales	Mayor a 15000	Total o parcial	4	LL	100	8	2	540	3	205	205	3.65	2.4	Var.	24.2+Var	525	6:1	4:1	2:1	3:2
				ON	80	8	3	540	5	149	107	3.65	2.4	Var.	24.2+Var	296	6:1	4:1	2:1	3:2
				MO	60	10	4	330	6	91	70	3.65	2.4	Var.	24.2+Var	149	3:1	3:2		
Principales o intermedias	5000 a 15000	Parcial	2	LL	80	8	3	540	3	149	107	3.65	2.4	-	12.10	296	4:1	4:1	2:1	3:2
				ON	60	8	4	540	5	91	70	3.65	2.4	-	12.10	149	4:1	4:1	2:1	3:2
				MO	50	10	5	240	7	68	54	3.65	2.4	-	12.10	94	3:1	3:2		
Secundarias	1000 a 5000	Parcial o sin control	2	LL	60	8	3	540	5	89	71	3.25	1.75	-	10.00	157	4:1	4:1	2:1	3:2
				ON	50	10	4	330	6	67	55	3.25	1.75	-	10.00	98	4:1	3:1	2:1	3:2
				MO	40	10	5	240	7	47	42	3.25	1.75	-	10.00	57	3:1	3:2		
Vecinales	150 a 1000	Sin control	2	LL	50	8	4	330	6	67	55	2.75	0.75	-	7.00	98	3:1	2:1	3:2	
				ON	40	10	5	240	7	47	42	2.75	0.75	-	7.00	57	3:1	2:1	3:2	
				MO	30	10	6	180	8	31	29	2.75	0.75	-	7.00	30	3:2			
Parametrón	Menos de 150	Sin control	2	LL	40	8	5	240	7	47	42	2.00	0.75	-	5.50	57	2:1		3:2	
				ON	30	10	6	180	10	31	29	2.00	0.75	-	5.50	30	2:1		3:2	
				MO	20	10	7	160	12	18	17	2.00	0.75	-	5.50	11	1:1			

Ilustración 20 - Parámetros de diseño geométrico resumido

Fuente: (SOPTRAVI, 1996)

3.2.2. MANUAL DE CARRETERAS – TUNELES, MUROS Y OBRAS COMPLEMENTARIAS

Toda la información que a continuación se presenta proviene del “Manual de Carreteras – Túneles, Muros y Obras Complementarias Edición 2016” que pertenece al Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) ubicado en Perú.

El presente documento tiene por objetivo funcionar como el principal instrumento de apoyo en el país de Perú para el diseño geométrico y estructural de obras subterráneas tales como túneles carreteros y ferroviarios, al igual que otras obras complementarias como lo pueden muros de contención y canales hidráulicos pertenecientes a las carreteras.

En cuanto a la teoría que abarca el manual con respecto al diseño geométrico de túneles se presenta en el capítulo 2 del documento respectivamente, y contiene la siguiente información:

1) Generalidades

El diseño geométrico de los túneles difiere de otros elementos de la vía, básicamente en los aspectos siguientes:

- Es un parámetro de entrada para el diseño de la carretera (sobre todo en perfil).
- No tiene actividad lateral.
- Las diferencias estacionales son menos marcadas.
- Igual iluminación de día y de noche con excepción de los portales.
- El diseño geométrico del túnel es de gran importancia, principalmente desde el punto de vista de la Seguridad Vial del usuario, así como de las etapas de construcción y mantenimiento.
- La sección transversal tipo del túnel, suele obedecer más a aspectos propios del túnel (geología, método constructivo, instalaciones, seguridad, etc.) que, a datos generales de la carretera, por lo que se puede independizar del resto de la misma.
- Se prohíbe el adelantamiento en túneles de dos sentidos (bidireccional).
- Pendiente longitudinal limitada.

El diseño en planta y perfil del túnel, dependen del diseño geométrico del resto de la carretera y de las características de ésta, con la que tiene que mantener homogeneidad.

2) Tipo de Túneles (Rurales y Urbanos)

Por lo general los tipos de túneles empleados en carreteras son: por su longitud, por el tipo de material, por el tipo de sección y otros.

A continuación, se describen algunos tipos:

- En roca

Son aquellos cuyo material predominante está constituido por rocas, y que para su excavación requiere el uso de un sistema de perforación y voladura y/o excavación mecánica.

- En suelos

Son aquellos cuyo material predominante está constituido por suelos y que para su ejecución se requiere excavación mecánica y elementos de sostenimiento.

- Artificiales (falso túnel)

Estructura, por lo general de concreto armado, que se construye a cielo abierto luego de cortar el terreno y que posteriormente se recubre con material de relleno (propio o de préstamo).

3) Diseño Geométrico en Planta

El diseño del trazo en planta de un túnel está sujeto a las mismas limitaciones y recomendaciones del diseño geométrico de la carretera, excepto algunas particularidades específicas propias del túnel. El trazo no puede variarse de forma sustancial de la carretera.

La velocidad de diseño de los vehículos dentro del túnel determinará el diseño geométrico del trazo correspondiente, que se hará de acuerdo con lo establecido en el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico, vigente.

La velocidad máxima de operación dentro del túnel será la que corresponde a la velocidad de diseño de la carretera reducida en no menos del 20 % o reducido en 20 km/h por tramos consecutivos.

Deberán tenerse en cuenta los factores geológico-geotécnicos existentes y se procurará evitar los puntos o zonas conflictivas: fallas geológicas, zonas alteradas y otros.

Para el diseño en planta, a continuación, se establecen los siguientes criterios:

a) Portales:

Se recomienda que el trazo de la aproximación al túnel, sea tal que el portal de éste sea visible por el conductor como mínimo, 15 segundos antes de llegar a él en cualquier circunstancia. Es decir, si V es la velocidad de proyecto de la carretera en Km/h, el portal debe ser visible desde una distancia mínima dada por la expresión:

$$L = 4.17 * V , \text{ donde } L \text{ está dado en metros.}$$

Ecuación 3 - Distancia mínima de visibilidad

Fuente: (MTC, 2016)

Por otra parte, para evitar el deslumbramiento debido a la luz del día en túneles de longitudes mayores a 500.00 m, es conveniente disponer una curva cerca del portal en función a la velocidad de diseño, con el objeto que desde dentro del túnel no sea visible el exterior.

b) Enlaces próximos al túnel:

Es recomendable no realizar ningún tipo de conexión, intersección o rotonda en la calzada, ni modificación del número de carriles en los 300 metros, anteriores o posteriores, del inicio o final del túnel.

c) Enlaces dentro del túnel:

Se evitará los enlaces, en las entradas, salidas y dentro del túnel. Si son inevitables (por ejemplo, en tramos urbanos) se reforzará la iluminación en dichas zonas. Las bifurcaciones se señalizarán antes del inicio túnel para que cada vehículo ingrese a este por el carril correspondiente a la salida que vaya a tomar y, de este modo, evitar, en lo posible, los cambios de carril dentro del túnel.

En las incorporaciones se aumentará el número de carriles posterior al enlace, de forma que los vehículos que entran no tengan que incorporarse a carriles ocupados por otros vehículos.

d) Visibilidad en las curvas:

Dentro del túnel se debe mantener una distancia de visibilidad mínima superior a la distancia de parada en caso de una incidencia.

El Centro de Estudios de Túneles de Francia (CETU) ha elaborado un modelo que relaciona la velocidad de proyecto, la pendiente del trazo y el radio de curvatura mínimo admisible. La expresión correspondiente es:

$$R = \frac{Dv^2}{8e}$$

Ecuación 4 - Distancia de visibilidad en un túnel en curva

Fuente: (MTC, 2016)

El valor de e dependerá de los anchos de bermas y veredas adoptadas para la sección tipo del túnel, y es distinto según sea la curva a la derecha o a la izquierda.

El trazo en planta de una carretera se compone de la adecuada combinación de los siguientes elementos: tangente, curva circular y curva de transición. Para el diseño de estos elementos en el túnel se seguirán las consideraciones y las características máximas y mínimas que figuran en el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico, vigente.

La recta o tangente es un elemento de trazo que está indicado en carreteras de dos carriles para obtener suficientes oportunidades de adelantamiento y en cualquier tipo de carretera para adaptarse a condicionamientos externos obligados (infraestructuras preexistentes), condiciones urbanísticas, terrenos llanos, etc.).

Las longitudes mínimas admisibles y máximas deseables en los tramos en tangente en los túneles de un solo sentido, estarán de acuerdo a lo establecido en el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico vigente, en función de la velocidad de diseño.

$$L_{\min.s} = 1.39 \times V; \quad L_{\min.o} = 2.78 \times V; \quad L_{\max} = 16.70 \times V$$

Donde:

- $L_{\min.s}$ = Longitud mínima (m) para trazos en "S" (alineamiento recto entre alineamientos con radios de curvatura de sentido contrario).
- $L_{\min.o}$ = Longitud mínima (m) para el resto de casos (alineamiento recto entre alineamientos con radios de curvatura del mismo sentido).
- L_{\max} = Longitud máxima deseable (m).
- V = Velocidad de diseño (km/h)

Ecuación 5 - Longitudes en base a la velocidad de diseño

Fuente: (MTC, 2016)

Para el diseño de las curvas circulares se seguirá lo establecido en el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico, donde los radios mínimos y los peraltes máximos, son los que se aprecian a continuación:

Ubicación de la vía	Velocidad de diseño	P máx (%)	f máx	Radio calculado (m)	Radio redondeado (m)
Área urbana	30	4,00	0,17	33,7	35
	40	4,00	0,17	60,0	60
	50	4,00	0,16	98,4	100
	60	4,00	0,15	149,2	150
	70	4,00	0,14	214,3	215
	80	4,00	0,14	280,0	280
	90	4,00	0,13	375,2	375
	100	4,00	0,12	835,2	495
	110	4,00	0,11	1.108,9	635
	120	4,00	0,19	872,2	875
	130	4,00	0,08	1.108,9	1.110
Área rural (con peligro de hielo)	30	6,00	0,17	30,8	30
	40	6,00	0,17	54,8	55
	50	6,00	0,16	89,5	90
	60	6,00	0,15	135,0	135
	70	6,00	0,14	192,9	195
	80	6,00	0,14	252,9	255
	90	6,00	0,13	437,4	335
	100	6,00	0,12	560,4	440
	110	6,00	0,11	755,9	560
	120	6,00	0,09	950,5	755
	130	6,00	0,08	1.187,2	950

Ilustración 21 - Radios mínimos y peraltes máximos

Fuente: (MTC, 2016)

4) Diseño Geométrico en Perfil

En el perfil longitudinal se consideran prioritarias las características funcionales de seguridad y comodidad que se deriven de la visibilidad disponible, que genere una deseable ausencia de pérdidas de trazo y de una variación continua y gradual.

a) Pendiente

Una primera condición para el trazo en perfil de un túnel es el drenaje de las aguas que afloran al mismo procedentes del terreno. Se debe asegurar una pendiente mínima de orden de 0.5%, a fin de asegurar en todo punto de la calzada un drenaje de las aguas superficiales. Se pueden presentar los siguientes casos particulares:

- Si la calzada posee un bombeo de 2% y no existen bermas y/o cunetas, se podrá adoptar excepcionalmente sectores con pendientes de hasta 0,2%.
- Si el bombeo es de 2.5% excepcionalmente podrá adoptarse pendientes iguales a cero.
- Si existen bermas, la pendiente mínima deseable será de 0.5% y la mínima excepcional de 0.35%.
- En zonas de transición de peralte, en que la pendiente transversal se anula, la pendiente mínima deberá ser de 0.5%.

Asimismo, deben evitarse los diseños cóncavos que produzcan puntos bajos, pues se necesitaría en ellos disponer un bombeo para impedir la acumulación de agua.

La emisión de gases contaminantes de los vehículos aumenta con la inclinación de la rampa y se hace excesiva a partir de un 2% de pendiente.

La velocidad de los vehículos pesados se reduce excesivamente en rampas superiores a esos valores, lo que obligaría a diseñar carriles adicionales para vehículos lentos.

La experiencia demuestra que cuanto mayor es la rampa, mayor es la probabilidad de que se produzca una avería de un vehículo, que quedaría inmovilizado, provocando reducción de la capacidad y riesgo de colisión.

Las pendientes descendentes son, por el contrario, beneficiosas por las razones contrarias a las anteriores, aunque en caso de incendio son perjudiciales por el efecto chimenea.

Las pendientes máximas serán determinadas de acuerdo a lo establecido en el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico vigente, no obstante, podrán variarse de acuerdo a las condiciones específicas del proyecto, al criterio y experiencia del proyectista; adicionalmente tomar en cuenta lo establecido en la siguiente tabla que recoge las limitaciones de rampas y pendientes en función de la longitud del túnel:

Longitud túnel (m)	<50	50-150	150-300	300-500	500-1000	>1000
Rampa máxima (%)	6	4	3	3	2	2
Pendiente máxima (%)	8	8	5	4	4	4

Ilustración 22 - Pendientes y rampas máximas

Fuente: (MTC, 2016)

En cualquier caso, salvo justificación en contrario, el trazo en perfil del túnel será tal que en toda su longitud la velocidad de los vehículos pesados no sea inferior a la velocidad de diseño de acuerdo a la categoría de la carretera.

5) Sección Transversal

En el dimensionamiento de la sección transversal de un túnel entran en juego diversos factores: ancho necesario para la circulación del tráfico, gálibo necesario para la circulación de los vehículos, ancho de las veredas, bermas, necesidades geométricas de las instalaciones como pase de ductos, sistemas de drenaje, entre otros equipamientos del túnel y por último, la propia construcción del túnel.

Por cuestiones de seguridad, es recomendable que los túneles sean como mínimo de dos carriles, no obstante, en casos debidamente justificados, la autoridad competente podrá autorizar la ejecución de proyectos de túneles con un solo carril.

a) Ancho de plataforma

El ancho de los carriles es generalmente de 3.60 m como mínimo en concordancia con el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico vigente; normalmente no se emplean carriles más estrechos de dichos valores, salvo circunstancias excepcionales como son los carriles adicionales para vehículos lentos que pueden ser de 3.00 m. En algunos casos podrían utilizarse anchos de carril diferentes a los señalados, los que deberán ser técnicamente justificados para las características específicas de cada proyecto.

Los tres carriles se utilizan en túneles unidireccionales con mucho tráfico (en áreas urbanas), o en túneles bidireccionales con rampa superior a un 3%, y con un carril para vehículos lentos.

Para el caso de túneles urbanos se deberá disponer de un ancho mínimo de berma de 3.00 m, y para los túneles rurales se deberá disponer un ancho mínimo de berma de 1.20 m, pudiéndose utilizar anchos menores, dependiendo de las características del túnel, lo cual deberá ser justificado por el proyectista.

b) Galibo

El galibo no será inferior a 5.50 m, en ningún punto de la plataforma ni en las zonas accesibles a los vehículos; además el túnel deberá tener una altura adicional suficiente que permita la instalación de los elementos auxiliares como equipos de ventilación, iluminación y seguridad contra incendios en los casos que corresponda. Sobre las veredas podrá ser suficiente una altura mínima libre de 2.40 m.

c) Ancho en veredas

Para el caso de túneles urbanos accesibles a los peatones de forma habitual, el ancho de la vereda será como mínimo de 1.50 m y estará aislada de la calzada con barreras rígidas, flexibles u otro medio. En el resto de los túneles la circulación de peatones se limita a los usuarios de vehículos averiados y a los empleados de mantenimiento

Para el caso de túneles rurales la vereda deberá permitir el paso de un hombre caminando, lo que requiere un ancho mínimo de 75.00 cm.

3.2.3. LRFD ROAD TUNNEL DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDE SPECIFICATIONS

Toda la información que a continuación se presenta proviene del “LRFD Road Tunnel Design and Construction Guide Specifications” que fue publicado por la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO); esta guía contiene información actualizada acerca del diseño geométrico y estructural de túneles ya sean carreteros y mineros, así como el énfasis principal que hace en el diseño por factores de carga y resistencia (LRFD).

El presente documento tiene como objetivo principal definir los estados límites de resistencia y sus factores a tomar en cuenta por cada tipo de carga que puede llegar a recaer sobre un túnel, ya puede ser carga viva o carga muerta, cargas de agua, cargas de viento, etc.

A continuación, se desglosará la teoría referente al diseño estructural de túneles carreteros que corresponde a la sección 3 y 6 del documento; cabe recalcar que la información esta originalmente en el idioma inglés, pero será traducida al español lo mejor que se pueda:

1) Estados Limite y Factores de Resistencia

a) Estado Limite de Servicio

Servicio T-I: Los túneles cortados y cubiertos se investigarán en lo que respecta a las deflexiones, el control de las grietas, las vibraciones, la durabilidad, la estanqueidad y la fatiga, tal como se desarrollan durante la vida útil del túnel.

Servicio T-IA: Se investigarán los efectos de la flotabilidad durante la vida útil del túnel, incluyendo, pero sin limitarse a ello, las elevaciones máximas de las aguas subterráneas y los cambios en la elevación de las aguas subterráneas causados por las mareas y las inundaciones. Se incluirá el efecto de la salinidad y otras inclusiones en las aguas subterráneas que afecten al peso unitario de éstas.

Servicio T-II: Los túneles cortados y cubiertos se investigarán para detectar los efectos de la flotabilidad que se producen durante la construcción. Se comprobará la deflexión de los túneles cortados y cubiertos durante las condiciones de arriostamiento temporal cuando los elementos verticales de la pared se incorporen a la estructura final. Se evaluará el movimiento del suelo como resultado de las deflexiones de los muros del SOE que también son muros estructurales

permanentes de la estructura. Se evaluarán las estructuras e infraestructuras adyacentes que puedan verse afectadas por estos movimientos del terreno y se protegerán contra los posibles efectos adversos del movimiento del terreno.

b) Estado Limite de Resistencia

Resistencia T-I: Se investigará la resistencia de los túneles cortados y cubiertos durante su uso normal, en el que el túnel sigue siendo totalmente utilizable sin ningún daño.

Resistencia T-II: Se investigará la resistencia de los túneles cortados y cubiertos durante la construcción, incluyendo, pero sin limitarse a ello, la secuencia de construcción, la instalación y retirada de los refuerzos temporales, el relleno y la carga de la fase de construcción.

c) Estado Limite de Evento Extremo

Evento extremo T-I: Los túneles cortados y cubiertos deberán ser investigados en caso de terremoto para garantizar la seguridad de la vida y la supervivencia de la estructura teniendo en cuenta el colapso progresivo. progresivo.

En el caso extremo T-I, el nivel aceptable de daños podría incluir el fallo parcial de los elementos del túnel que den lugar a fugas limitadas y podría incluir la pérdida total del servicio. incluir la pérdida total del servicio.

Evento extremo T-II: Los túneles de corte y recubrimiento deben ser investigados para eventos extremos distintos a los terremotos. Otros eventos extremos, como explosiones e incendios, deberán ser considerados sobre la base de un proyecto específico y, si es pertinente, se incluirá en el Evento Extremo II individualmente pero no simultáneamente con otros eventos. El propietario podrá, a su discreción, y tras realizar un análisis de riesgos, crear combinaciones de carga que que tengan más de una de estas cargas aplicadas a la estructura simultáneamente.

En el caso extremo T-II, se recomienda que el túnel no sufra más que daños leves y/o fugas menores, sin que se produzca una pérdida significativa de servicio durante la ejecución de las reparaciones, es decir, un nivel de rendimiento parcial o nivel de rendimiento.

Evento extremo T-III: Los túneles cortados y cubiertos serán investigado para un evento raro para la combinación simultánea de cargas como las inundaciones. Esta combinación de cargas se utilizará para la inundación de la superficie que eleva la elevación del agua subterránea y para la inundación del interior del túnel.

En el caso extremo T-III, se investigarán los siguientes casos de inundación se investigarán los siguientes casos de inundación:

- El nivel del mar o las elevaciones de las aguas superficiales suben y producen un aumento de las presiones hidrostáticas en el túnel que también reducen la resistencia a la flotación.
- Se produce una inundación del interior del túnel que aumenta la resistencia al empuje y reduce la presión hidrostática neta a cero. presión hidrostática neta a cero.

2) Factores de Carga y Combinaciones de Carga

Los túneles de falso techo se diseñarán para las combinaciones de carga que figuran en la siguiente Ilustración. Al desarrollar las cargas que se aplicarán a la estructura se desarrollará cada una de las posibles combinaciones de cargas desarrolladas. Se puede utilizar el criterio de ingeniería para eliminar las combinaciones que no rigen:

Load Combination Limit State	CR DC DW EH ES EV PI PS SE SH	BR CE IA IM LL LS PL	WA W _f	AP	TG	TU	CS	EQ	Use One of These at a Time	
									AD FI BL SS	WA _f WA _{bu}
Strength T-I	γ_p	1.75	1.0	1.0	γ_{TG}	0.5/1.2	-	-	-	-
Strength T-II	γ_p	-	1.0	-	-	-	1.3	-	-	-
Extreme Event T-I	γ_p	0.5	1.0	0.5	-	-	-	1.0	-	-
Extreme Event T-II	γ_p	0.5	1.0	0.5	-	-	-	-	1.0	-
Extreme Event T-III	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	1.1
Service T-I	1.0	1.0	1.0	1.0	γ_{TG}	1.0/1.2	-	-	-	-
Service T-IA	γ_p	-	1.1	-	-	-	-	-	-	-
Service T-II	1.0	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-
Fatigue T-I <i>LL, IM & IA only</i>	-	1.5	-	1.1	-	-	-	-	-	-

Ilustración 23 - Combinaciones de carga

Fuente: (AASHTO, 2017)

Continuando con los factores de carga, la Ilustración 23 se expande un poco más para los tipos de carga adicionales a tomar en cuenta, algunos son opcionales, otros dependen del túnel a diseñar y algunos pueden obviarse, estos se pueden apreciar en la Ilustración 24:

Type of Load	Load Factor	
	Maximum	Minimum
CR: Creep (using $I_{effective}$)	1.00	1.00
CR: Creep (using I_p)	0.50	0.50
DC: Components & non-structural attachments	1.25	0.90
DC: Service T-IA Only	0.90	N/A
DW: Wearing Surface	1.50	0.65
EH: Horizontal Earth Pressure		
- Cut-and-cover & immersed tunnels		
• Active	1.35	0.75
• At-rest	1.35	0.75
• AEP for walls with multiple levels of anchors or braces	1.35	N/A
- Mined & bored tunnels	1.35	0.90
EH: Service T-IA only	0.95	N/A
EV: Vertical Earth Pressures		
- Cut-and-cover & immersed tunnels	1.35	0.75
- Mined & bored tunnels	1.35	0.75
ES: Earth surcharge and foundation loads	1.35	0.75
ES: Service T-IA only	1.00	0.00
PI: Piping loads	1.30	1.00
PS: Secondary loads due to prestressing (using $I_{effective}$)	1.00	1.00
PS: Secondary loads due to prestressing (using I_p)	0.50	0.50
SE : Settlement	1.30	0.00
SH: Shrinkage (using $I_{effective}$)	1.00	1.00
SH: Shrinkage (using I_p)	0.50	0.50

Ilustración 24 - Factores de carga según su tipo

Fuente: (AASHTO, 2017)

3.2.4. TECHNICAL MANUAL FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROAD TUNNELS

Toda la información que a continuación se presenta proviene del "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels" que fue publicado por la Administración Federal de Carreteras, ubicada en Estados Unidos, este manual fue hecho en colaboración con la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO).

Al igual que muchos manuales de túneles y carreteras, este documento trae consigo las especificaciones para el diseño geométrico y estructural de túneles carreteros tomando en cuenta varios aspectos geológicos y geotécnicos apreciados únicamente en Estados Unidos, pero con variaciones para ser aplicados de forma libre en otros países.

En cuanto a la teoría que abarca el manual acerca de las investigaciones geotécnicas necesarias para el diseño preliminar de un túnel, estas especificaciones se pueden apreciar en el capítulo 3 y 6 del manual y son de vital importancia para el correcto desarrollo de la estructura; cabe recalcar que la información esta originalmente en el idioma inglés, pero será traducida al español lo mejor que se pueda:

1) Investigaciones del subsuelo

Las condiciones del terreno, incluidas las geológicas, geotécnicas e hidrológicas, tienen un gran impacto en la planificación, el diseño, la construcción y el coste de un túnel de carretera, y a menudo determinan su viabilidad y su trazado final. Fundamentalmente, la investigación del subsuelo es el tipo de investigación más importante para obtener las condiciones del terreno, ya que es el medio principal para:

- Definir el perfil del subsuelo (es decir, la estratigrafía, la estructura y los principales tipos de suelo y roca)
- Determinar las propiedades del suelo y de los materiales rocosos y las características de la masa; - Identificar las anomalías geológicas, las zonas de fallas y otros peligros (suelos que se extienden, gas metano, etc.)
- Definir las condiciones hidrogeológicas (niveles de aguas subterráneas, acuíferos, presiones hidrostáticas, etc.)
- Identificar los posibles riesgos de construcción (rocas, etc.)

a) Identificación y clasificación de suelos

Es importante distinguir entre la identificación visual y la clasificación para minimizar los conflictos entre la identificación visual general de las muestras de suelo en el campo frente a una evaluación de laboratorio más precisa apoyada por pruebas de índice. Es importante enviar las muestras de suelo a un laboratorio para que un geólogo o un técnico con experiencia en el trabajo con suelos realice una identificación visual precisa, ya que esta única operación proporcionará la base para las pruebas posteriores y el desarrollo del perfil del suelo.

Durante la progresión de una perforación, el personal de campo debe describir la muestra encontrada de acuerdo con la norma ASTM D 2488, que es el **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)** modificado.

En su mayor parte, la clasificación del suelo sobre el terreno para un proyecto de túnel es similar a la de otras aplicaciones geotécnicas, salvo que debe prestarse especial atención a definir y documentar con precisión las características granulométricas del suelo y los rasgos de estratificación, ya que estas propiedades pueden tener una mayor influencia en el comportamiento del suelo y de las aguas subterráneas durante la excavación de un túnel que la que pueden tener en otros tipos de construcción, como en el caso de las cimentaciones, los terraplenes y los cortes.

b) Identificación y clasificación de rocas

En la roca, las características del macizo rocoso y las discontinuidades suelen tener una influencia mucho mayor en el comportamiento del suelo durante la excavación de un túnel y en la carga del mismo que las propiedades de la roca intacta. Por lo tanto, la clasificación de la roca debe centrarse en las características del macizo rocoso, así como en su origen y propiedades intactas para la aplicación típica de cimentación de carreteras. Las propiedades intactas especiales son importantes para la aplicación en túneles, en particular para la selección de cortadoras de roca para tuneladoras y otros tipos de excavadoras de roca, y para predecir el desgaste de las cortadoras.

El método de descripción de las discontinuidades de las masas rocosas se ajusta al "Método sugerido de descripción cuantitativa de las discontinuidades de las masas rocosas" (ISRM 1981) de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM). Las propiedades de índice obtenidas de la inspección del núcleo de roca recuperado incluyen la recuperación del núcleo (es decir, la longitud del núcleo recuperado expresada como un porcentaje de la longitud total del recorrido del núcleo), y la designación de la calidad de la roca o RQD (la longitud combinada de todos los segmentos de núcleo sanos e intactos iguales o mayores a 4 pulgadas de longitud, expresada como un porcentaje de la longitud total del recorrido del núcleo).

2) Pruebas in situ

Los ensayos in situ se utilizan para obtener directamente mediciones sobre el terreno de las propiedades útiles de la ingeniería de suelos y rocas. En el caso de los suelos, los ensayos in situ incluyen tanto los ensayos de tipo índice, como el ensayo de penetración estándar (SPT), como los ensayos que determinan las propiedades físicas del suelo, como la resistencia al corte a partir de los ensayos de penetración de cono (CPT) y las propiedades de deformación del suelo a partir de los ensayos de medidor de presión (PMT).

3) Pruebas de laboratorio

- **Pruebas del suelo:** se requieren pruebas detalladas de laboratorio del suelo para obtener información precisa, incluyendo la clasificación, las características, la rigidez, la resistencia, etc. para fines de diseño y modelización. Las pruebas se realizan en muestras representativas seleccionadas (perturbadas y no perturbadas) de acuerdo con las normas ASTM.
- **Pruebas de rocas:** las pruebas de rocas estándar evalúan las propiedades físicas de la roca, incluyendo la densidad y la mineralogía (análisis de secciones finas). Las propiedades mecánicas del núcleo de roca intacto incluyeron la resistencia a la compresión uniaxial, la resistencia a la tracción, las constantes elásticas estáticas y dinámicas, la dureza y los índices de abrasividad.

4) Clasificaciones de Masas Rocosas

Se han desarrollado esquemas de clasificación de macizos rocosos para ayudar (principalmente) a la agrupación de rocas en grupos comunes o similares. El primer sistema verdaderamente organizado fue propuesto por el Dr. Karl Terzaghi (1946) y ha sido seguido por una serie de esquemas propuestos por otros. El sistema de Terzaghi era principalmente cualitativo y otros son de naturaleza más cuantitativa. En las siguientes subsecciones se explican tres sistemas y se muestra cómo pueden utilizarse para empezar a desarrollar y aplicar clasificaciones numéricas a la selección del sostenimiento y el revestimiento de los túneles de roca.

a) RQD

En 1966, Deere y Miller desarrollaron el índice de designación de la calidad de la roca (RQD) para proporcionar un método sistemático de descripción de la calidad de la masa rocosa a partir de los resultados de los registros de núcleos de perforación. Deere describió el RQD como la longitud (como porcentaje de la longitud total del núcleo) de los trozos de núcleo intactos y sanos que tienen 4 pulgadas (10 cm) o más de longitud. Se han desarrollado varios métodos propuestos para utilizar el RQD en el diseño de túneles de roca. Sin embargo, el principal uso del RQD en el diseño moderno de túneles es como factor principal en los sistemas de clasificación de macizos rocosos Q o RMR que se describen más adelante.

b) Sistema Q

A partir de la evaluación de un gran número de casos de excavaciones subterráneas, Barton et al. (1974) del Instituto Geotécnico Noruego propusieron un Índice de Calidad de Túneles (Q) para determinar las características del macizo rocoso y los requisitos de sostenimiento de los túneles. Según su promotor: "La aplicación tradicional del valor Q de seis parámetros en la ingeniería de rocas es para seleccionar combinaciones adecuadas de hormigón proyectado y pernos de roca para el refuerzo del macizo rocoso, y principalmente para proyectos de ingeniería civil". El valor numérico del índice Q varía en una escala logarítmica de 0,001 a un máximo de 1.000 y se estima a partir de la Ecuación 1.

La Ilustración 25 da la clasificación de los parámetros individuales utilizados para obtener el Índice de Calidad de Túneles (Q) para un macizo rocoso. Hay que tener en cuenta que Barton ha incorporado la evaluación de más de 1000 túneles en el desarrollo del sistema Q:

DESCRIPTION	VALUE	NOTES	
1. ROCK QUALITY DESIGNATION	RQD		
A. Very poor	0 - 25	1. Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q.	
B. Poor	25 - 50		
C. Fair	50 - 75		
D. Good	75 - 90	2. RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90 etc. are sufficiently accurate.	
E. Excellent	90 - 100		
2. JOINT SET NUMBER	J_n		
A. Massive, no or few joints	0.5 - 1.0		
B. One joint set	2		
C. One joint set plus random	3		
D. Two joint sets	4		
E. Two joint sets plus random	6		
F. Three joint sets	9	1. For intersections use $(3.0 \times J_n)$	
G. Three joint sets plus random	12		
H. Four or more joint sets, random, heavily jointed, 'sugar cube', etc.	15	2. For portals use $(2.0 \times J_n)$	
J. Crushed rock, earthlike	20		
3. JOINT ROUGHNESS NUMBER	J_r		
a. Rock wall contact			
b. Rock wall contact before 10 cm shear			
A. Discontinuous joints	4		
B. Rough and irregular, undulating	3		
C. Smooth undulating	2		
D. Slickensided undulating	1.5	1. Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m.	
E. Rough or irregular, planar	1.5		
F. Smooth, planar	1.0		
G. Slickensided, planar	0.5	2. $J_r = 0.5$ can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided that the lineations are oriented for minimum strength.	
c. No rock wall contact when sheared			
H. Zones containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)		
J. Sandy, gravely or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)		
4. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ_r degrees (approx.)	
a. Rock wall contact			
A. Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling	0.75	1. Values of ϕ_r , the residual friction angle, are intended as an approximate guide to the mineralogical properties of the alteration products, if present.	
B. Unaltered joint walls, surface staining only	1.0		25 - 35
C. Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0		25 - 30
D. Silty-, or sandy-clay coatings, small clay-fraction (non-softening)	3.0		20 - 25
E. Softening or low-friction clay mineral coatings, i.e. kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum and graphite etc., and small quantities of swelling clays. (Discontinuous coatings, 1 - 2 mm or less)	4.0		8 - 16

4, JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ or degrees (approx.)	
b. Rock wall contact before 10 cm shear			
F. Sandy particles, clay-free, disintegrating rock etc.	4.0	25 - 30	
G. Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	6.0	16 - 24	
H. Medium or low over-consolidation, softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	8.0	12 - 16	
J. Swelling clay fillings, i.e. montmorillonite, (continuous < 5 mm thick). Values of J_a depend on percent of swelling clay-size particles, and access to water.	8.0 - 12.0	6 - 12	
c. No rock wall contact when sheared			
K. Zones or bands of disintegrated or crushed	6.0		
L. rock and clay (see G, H and J for clay	8.0		
M. conditions)	8.0 - 12.0	6 - 24	
N. Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction, non-softening	5.0		
O. Thick continuous zones or bands of clay	10.0 - 13.0		
P. & R. (see G.H and J for clay conditions)	6.0 - 24.0		
5. JOINT WATER REDUCTION	J_w	approx. water pressure (kgf/cm ²)	
A. Dry excavation or minor inflow i.e. < 5 l/m locally	1.0	< 1.0	
B. Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.66	1.0 - 2.5	
C. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5	2.5 - 10.0	1. Factors C to F are crude estimates; increase J_w if drainage installed.
D. Large inflow or high pressure	0.33	2.5 - 10.0	
E. Exceptionally high inflow or pressure at blasting, decaying with time	0.2 - 0.1	> 10	2. Special problems caused by ice formation are not considered.
F. Exceptionally high inflow or pressure	0.1 - 0.05	> 10	
6. STRESS REDUCTION FACTOR		SRF	
a. Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated			
A. Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)		10.0	1. Reduce these values of SRF by 25 - 50% but only if the relevant shear zones influence do not intersect the excavation
B. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth < 50 m)		5.0	
C. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth > 50 m)		2.5	
D. Multiple shear zones in competent rock (clay free), loose surrounding rock (any depth)		7.5	
E. Single shear zone in competent rock (clay free). (depth of excavation < 50 m)		5.0	
F. Single shear zone in competent rock (clay free). (depth of excavation > 50 m)		2.5	
G. Loose open joints, heavily jointed or 'sugar cube', (any depth)		5.0	

DESCRIPTION	VALUE		NOTES
6. STRESS REDUCTION FACTOR			SRF
<i>b. Competent rock, rock stress problems</i>			
	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	
H. Low stress, near surface	> 200	> 13	2.5
J. Medium stress	200 - 10	13 - 0.66	1.0
K. High stress, very tight structure (usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability)	10 - 5	0.66 - 0.33	0.5 - 2
L. Mild rockburst (massive rock)	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10
M. Heavy rockburst (massive rock)	< 2.5	< 0.16	10 - 20
<i>c. Squeezing rock, plastic flow of incompetent rock under influence of high rock pressure</i>			
N. Mild squeezing rock pressure			5 - 10
O. Heavy squeezing rock pressure			10 - 20
<i>d. Swelling rock, chemical swelling activity depending on presence of water</i>			
P. Mild swelling rock pressure			5 - 10
R. Heavy swelling rock pressure			10 - 15
ADDITIONAL NOTES ON THE USE OF THESE TABLES			
When making estimates of the rock mass Quality (Q), the following guidelines should be followed in addition to the notes listed in the tables:			
1. When borehole core is unavailable, RQD can be estimated from the number of joints per unit volume, in which the number of joints per metre for each joint set are added. A simple relationship can be used to convert this number to RQD for the case of clay free rock masses: $RQD = 115 - 3.3 J_v$ (approx.), where J_v = total number of joints per m^3 ($0 < RQD < 100$ for $35 > J_v > 4.5$).			
2. The parameter J_n representing the number of joint sets will often be affected by foliation, schistosity, slaty cleavage or bedding etc. If strongly developed, these parallel 'joints' should obviously be counted as a complete joint set. However, if there are few 'joints' visible, or if only occasional breaks in the core are due to these features, then it will be more appropriate to count them as 'random' joints when evaluating J_n .			
3. The parameters J_r and J_a (representing shear strength) should be relevant to the weakest significant joint set or clay filled discontinuity in the given zone. However, if the joint set or discontinuity with the minimum value of J_r/J_a is favourably oriented for stability, then a second, less favourably oriented joint set or discontinuity may sometimes be more significant, and its higher value of J_r/J_a should be used when evaluating Q. The value of J_r/J_a should in fact relate to the surface most likely to allow failure to initiate.			
4. When a rock mass contains clay, the factor SRF appropriate to loosening loads should be evaluated. In such cases the strength of the intact rock is of little interest. However, when jointing is minimal and clay is completely absent, the strength of the intact rock may become the weakest link, and the stability will then depend on the ratio rock-stress/rock-strength. A strongly anisotropic stress field is unfavourable for stability and is roughly accounted for as in note 2 in the table for stress reduction factor evaluation.			
5. The compressive and tensile strengths (σ_c and σ_t) of the intact rock should be evaluated in the saturated condition if this is appropriate to the present and future in situ conditions. A very conservative estimate of the strength should be made for those rocks that deteriorate when exposed to moist or saturated conditions.			

Ilustración 25 - Clasificación de parámetros individuales para el sistema Q

Fuente: (NHI, 2009)

Una vez determinado el índice Q se puede proseguir con la determinación del soporte para la excavación (sostenimiento) que ayuda a salvaguardar la obra en caso de derrumbes durante o después del proceso constructivo. En caso de que no se esté de acuerdo con la clasificación anterior aún se puede optar por el sistema RMR.

c) Sistema Rock Mass Rating (RMR)

Z.T. Bieniawski (1989) ha desarrollado el sistema Rock Mass Rating (RMR) siguiendo un poco la línea del sistema Q. El RMR utiliza seis parámetros, a saber:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca
- RQD
- Espacio de las discontinuidades
- Condición de las discontinuidades
- Condición del agua subterránea
- Orientación de las discontinuidades

Las calificaciones para cada uno de estos parámetros se obtienen de la Ilustración 26. La suma de los seis parámetros se convierte en el valor básico del RMR, como se demuestra en el siguiente ejemplo. Mas adelante se presenta cómo puede aplicarse el RMR para determinar los requisitos de sostenimiento de un túnel con un vano de 10 m (33 pies) de ancho.

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core Quality RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10-25	25-125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1,0.2	0.2-0.5	> 0.5		
	General conditions		Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300-400	200-300	100-200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35-45	25-35	15-25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)			< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (aperture)			None	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infilling (gouge)			None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering			Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Ratings			6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis					
Drive with dip-Dip 45-90°			Drive with dip-Dip 20-45°		Dip 45-90°		Dip 20-45°		
Very favourable			Favourable		Very favourable		Fair		
Drive against dip-Dip 45-90°			Drive against dip-Dip 20-45°		Dip 0-20-Irrespective of strike°				
Fair			Unfavourable		Fair				

Ilustración 26 - Sistema Rock Mass Rating

Fuente: (NHI, 2009)

En base a la Ilustración anterior se puede definir la calidad y clase de roca en base al sistema RMR cuyo valor final se puede utilizar para determinar el índice Q y viceversa mediante fórmulas.

Teniendo ya sea el índice Q o la clasificación RMR en mano se puede determinar el tipo de sostenimiento más adecuado mediante el siguiente gráfico en la Ilustración 27:

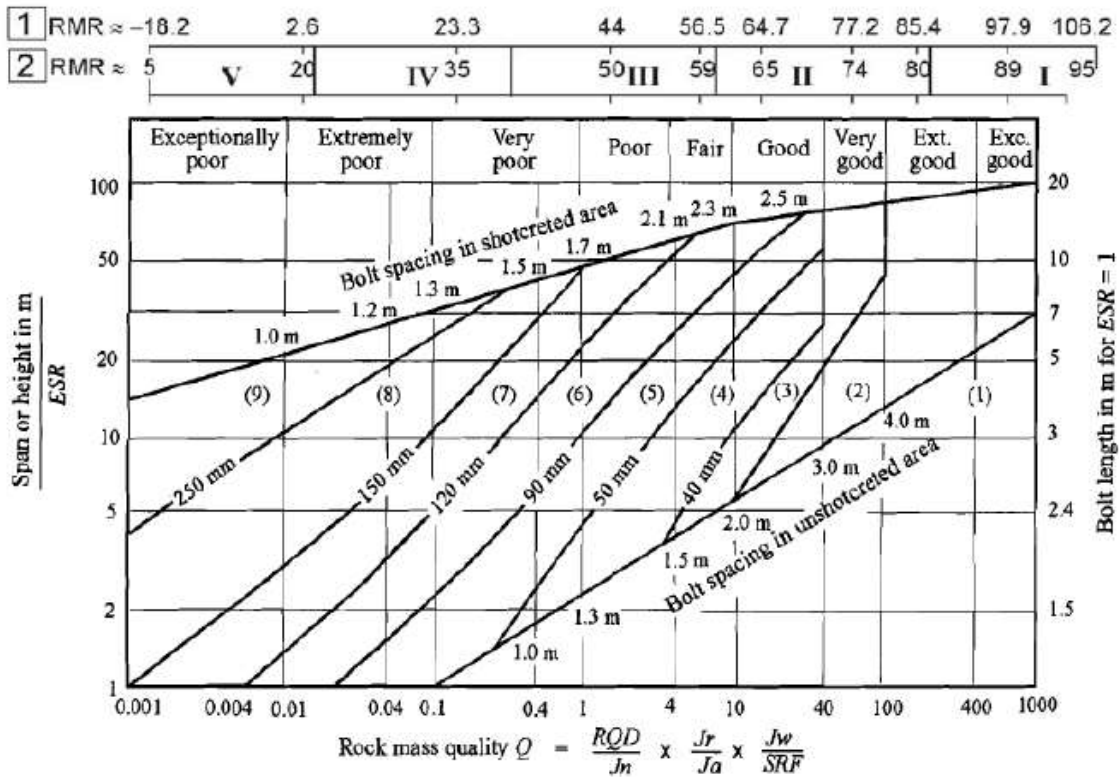


Ilustración 27 - Requerimiento de soporte de roca usando el índice Q

Fuente: (NHI, 2009)

Categorías de refuerzo:

- Sin soporte (1)
- Atornillado por puntos (2)
- Atornillado sistemático (3)
- Atornillado sistemático con hormigón proyectado no reforzado de 40-100 mm (4)
- Hormigón proyectado reforzado con fibra 50-90 mm y atornillado (5)
- Hormigón proyectado reforzado con fibra 90-120 mm y atornillado (6)
- Hormigón proyectado reforzado con fibra de 120-150 mm y atornillado (7)

- Hormigón proyectado reforzado con fibra > 150 mm con nervios reforzados de hormigón proyectado y atornillado (8)
- Revestimiento de hormigón fundido (9)

3.2.5. ALCANCE, VENTAJAS Y LIMITACIONES

3.2.5.1. ALCANCE

Las cuatro teorías de sustento mencionadas anteriormente son las ideales para la creación del manual de diseño de túneles carreteros que abarcan las especificaciones y normas que se deben tener presentes para llevar a cabo la implementación de este tipo de estructuras tanto dentro como fuera de la ciudad de San Pedro Sula si es posible. Estas incluyen los parámetros de diseño geométrico y estructural más habituales, la filosofía de diseño, al igual que las pruebas geotécnicas que se deben de llevar a cabo previo a la etapa constructiva. Cabe destacar que en la construcción de túneles carreteros solamente se consideran dos tipos de materiales en la parte estructural, el concreto hidráulico y el acero.

3.2.5.2. VENTAJAS

- 1) Requerimientos necesarios para el diseño de un túnel carretero en sectores rurales y urbanos.
- 2) Listado de las combinaciones de carga que se deben de tomar en cuenta.
- 3) Documentos creados específicamente para estructuras ubicadas en carreteras.
- 4) Brindan los materiales que se pueden utilizar para este tipo de obras y otros componentes.
- 5) Normas internacionales aplicadas a túneles carreteros implementados en países de Latinoamérica, por ejemplo, Perú.
- 6) Se adaptan a cualquier tipo de forma de túnel, de los cuales se sabe que existen dos solamente, cuadrados y semicirculares
- 7) Contienen las fórmulas y tablas necesarias para la clasificación de los tipos de roca; en el caso de la clasificación de suelos siempre recomienda clasificarlos por medio del sistema AASHTO o SUCS que son los más solicitados.

3.2.5.3. LIMITACIONES

Todas las teorías de sustento descritas en el apartado anterior, salvo la del “Manual de Carreteras” de SOPTRAVI, son internacionales, por lo cual tienen la limitación de no contener información nacional y de que algunas además se encuentran en otro idioma, en este caso el idioma inglés, por lo que se tuvo que traducir mucha de la información anteriormente expuesta.

3.3. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se presenta el marco conceptual, el cual es un listado de conceptos y definiciones que se presentan a lo largo del documento y que son imprescindibles para brindar al lector la comprensión del tema.

- 1) Túnel: “Es una obra subterránea de carácter lineal, cuyo objeto es la comunicación de dos puntos, para realizar el transporte de personas, materiales entre otras cosas. Normalmente es artificial” (EcuRED, 2021, párr. 1).
- 2) Túnel Carretero:

Túnel que se diseña para favorecer el paso fluyente, continuo, y seguro de vehículos motorizados, a través de los obstáculos topográficos que imponen el trazado de una carretera cruzando montañas y perforando macizos rocosos, con objeto de lograr un trazado común y funcional. (Real Academia de Ingeniería, 2021, párr. 1)
- 3) Boca (portal): “El portal de un túnel se puede definir como la intersección entre una ladera excavada y un túnel” (Polo, 2017).
- 4) Galibo vertical:

La altura libre mínima por encima de la calzada debe ser al menos igual a la máxima altura de diseño de los vehículos pesados autorizados en la carretera, aumentada en el espacio que permita los movimientos del vehículo debidos a irregularidades de la calzada o del propio vehículo. (PIARC, 2021, párr. 1)
- 5) Hastial: “Los muros presentes dentro una excavación horizontal o que posee una inclinación escasa” (Arkiplus, 2016, párr. 3).

- 6) Nicho: "Concavidad en el espesor de un muro, para colocar en ella una estatua, un jarrón u otra cosa" (ASALE & RAE, 2020c, párr. 1).
- 7) Carril: "Las bandas o franjas que dividen una calzada de forma longitudinal. Cada uno de estos carriles permite el tránsito de una fila de automóviles" (Definicion.de, 2017, párr. 1).
- 8) Calzada: "Se llama calzada al sector de la calle que se encuentra entre dos veredas (también conocidas como aceras)" (Definicion.de, 2018, párr. 2).
- 9) Vereda: "Camino angosto, formado comúnmente por el tránsito de peatones y ganados" (ASALE & RAE, 2020d, párr. 1).
- 10) Derecho de vía:

Es la franja de terreno propiedad del estado en la cual están alojados todos los elementos que constituyen la infraestructura de las carreteras, autopistas y puentes, asimismo puede alojar obras e instalaciones complementarias tales como líneas eléctricas, telegráficas y telefónicas, fibra óptica, ductos y cableados de muy diversa naturaleza e importancia económica y social. (TLAS, 2018, párr. 1)
- 11) Berma: "Espacio al pie de la muralla y declive exterior del terraplén, que servía para que la tierra y las piedras que se desprendían de ella al batirla el enemigo, se detuviesen y no cayeran dentro del foso" (ASALE & RAE, 2020a, párr. 1).
- 12) Cercha: "Las cerchas son arcos de acero que resisten en unión con otros elementos de sostenimiento, recogiendo los esfuerzos del terreno para resistir de forma conjunta" (Structuralia, 2020, párr. 5).
- 13) Bóveda: "Es un término arquitectónico para una forma arqueada que se utiliza para proporcionar un espacio con techo o techo" (ConceptoDefinición, 2021, párr. 1).
- 14) Contrabóveda: "Parte inferior del revestimiento del túnel que se construye en tramos de mala o dudosa calidad del terreno y que, con objeto de cerrarlo, se dispone bajo la solera del mismo y se apoya o ancla en la base de los hastiales" (Real Academia de Ingeniería, 2021, párr. 1).
- 15) Solera: "Parte inferior del revestimiento de un túnel sobre la cual se apoya el balasto o la vía o sobre la que se apoya la explanación que soportará la carretera" (Real Academia de Ingeniería, 2021, párr. 1).

- 16) Excavación: "En el sector de la construcción, excavar se refiere al movimiento de tierra o materiales para alcanzar el plano de arranque de la edificación y el acondicionamiento de los espacios destinados a las cimentaciones" (Prades, 2020, párr. 1)
- 17) Sección transversal: "Es un "corte" de 2 dimensiones en una figura de 3 dimensiones. Otra forma de ver esto es encontrando la intersección de un plano de 2 dimensiones y una figura de 3 dimensiones" (Tutors, 2021, párr. 1).
- 18) Curva vertical: "Las curvas verticales son las que enlazan dos tangentes consecutivas del alineamiento vertical, para que en su longitud se efectúe el paso gradual de la pendiente de la tangente de entrada a la de la tangente de salida" (Hudiel, 2011, p. 2).
- 19) Curva horizontal: "Se define como arcos de circunferencia de un solo radio que son utilizados para unir dos tangentes. de un alineamiento" (G. Caballero, 2021, p. 1).
- 20) Curva circular: "Las curvas circulares simples se definen como arcos de circunferencia de un solo radio que son utilizados para unir dos alineamientos rectos de una vía" (DOBLEVIA, 2007, párr. 1).
- 21) Radio: "El de la circunferencia que describe el arco de la curva" (DOBLEVIA, 2007, párr. 4).
- 22) Grado de Curvatura: "Corresponde al ángulo central subtendido por un arco o una cuerda unidad de determinada longitud, establecida como cuerda unidad (c) o arco unidad (s)" (DOBLEVIA, 2007, párr. 8).
- 23) Peralte: "No es más que la inclinación transversal de la calzada en las curvas horizontales que sirven para contrarrestar la fuerza centrífuga que tiende a desviar radialmente a los vehículos hacia fuera de su trayecto" (DEARKITECTURA, 2019, párr. 1).
- 24) Pendiente: "Magnitud que indica la inclinación de la superficie de una carretera con relación a la horizontal" (MOTORGIGA, 2021a, párr. 1).
- 25) Alineamiento vertical: "El alineamiento vertical es la proyección sobre un plano vertical del desarrollo del eje de la subcorona, al cual se le llama línea subrasante" (Hudiel, 2011, p. 2).
- 26) Alineamiento horizontal: El alineamiento horizontal es la proyección del eje de la subcorona del camino sobre un plano horizontal" (Hudiel, 2011, p. 2).

- 27) Trafico: "Es la circulación de vehículos, movimiento de mercancías o personas y, en términos informáticos, es el flujo de datos en la red" (Significados, 2021, párr. 1).
- 28) Señalización: "Elemento indispensable para el desarrollo de una circulación segura y correcta" (MOTORGIGA, 2021b, párr. 1).
- 29) Sostenimiento:
- El sistema de sostenimiento o entibación consiste en adosar tablas en contacto con el terreno que transmiten los esfuerzos del terreno a unos elementos más rígidos llamados tresillones y que a su vez descansan sobre puntales, también de madera, cuya misión es apuntalar la estructura de sostenimiento (Structuralia, 2020, párr. 3).
- 30) Revestimiento: "El revestimiento en la construcción se relaciona con el recubrimiento exterior e interior de una edificación, proporcionándole carácter, identidad y estética, además de brindarle durabilidad y valor de acuerdo al tipo de recubrimiento que se emplee" (DiccionArqui, 2016, párr. 1).
- 31) Mantenimiento: "Consiste en la realización de una serie de actividades, como reparaciones y actualizaciones, que permiten que el paso del tiempo no afecte al rendimiento de un bien de capital, propiedad de la empresa" (Westreicher, 2020, párr. 1).
- 32) Concreto: "Es una mezcla de piedras, arena, agua y cemento que al solidificarse constituye uno de los materiales de construcción más resistente para hacer bases y paredes" (ConceptoDefinición, 2021, párr. 1).
- 33) Velocidad de diseño: "Es la velocidad máxima que un vehículo puede recorrer con seguridad en esa carretera en condiciones perfectas" (Spiegato, 2021, párr. 1).
- 34) Iluminación: "La iluminación refiere a la acción y efecto de iluminar. También, por medio de esta palabra se alude a aquellas luces dispuestas en un determinado lugar con el objetivo de alumbrar o dar luz a algo" (EcuRED, 2021, párr. 1).
- 35) Ventilación: "Es un término que describe el acto y consecuencia de ventilar algo o a alguien o bien de ventilarse (es decir, dejar que el aire penetre en el cuerpo o hacerlo circular en algún ambiente)" (Definicion.de, 2012, párr. 1).

36) Roca: "Se define como una masa natural de minerales, la cual forma parte considerable de la corteza terrestre, y es originada a través de algún proceso geológico" (ConceptoDefinición, 2021, párr. 1).

37) Diaclasas: "Fractura o fisura em una masa rocosa em la que no se observa un movimiento relativo de sus lados" (Glosario Geología, 2012, párr. 1).

3.4. MARCO LEGAL

A continuación, se presenta el marco legal, que se compone de un artículo expuesto en torno a la Ley de Comunicación Terrestre, y le da validez al desarrollo de la investigación.

Ley de Vías de Comunicación Terrestre

Decreto No. 173

Artículo 10

Siendo el objetivo de la presente Ley el siguiente:

Artículo 10. - El estudio, apertura, construcción, ampliación, mejoramiento, mantenimiento y administración del sistema vial del país y de todo lo relacionado con la aplicación de la presente Ley, estará a cargo de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, por medio de la Dirección General de Caminos.

Como se menciona con anterioridad en el artículo 9, que corresponde a la Ley de Vías de Comunicación Terrestre, esta declara de necesidad y utilidad toda obra que tenga como principal objetivo ampliar y/o mejorar el sistema vial del país, lo que da a entender que está permitida la construcción e implementación de nuevas alternativas para solventar los problemas que actualmente existen en el sistema vial de Honduras.

Basándose en el artículo 10, se decide la creación de un manual para el diseño preliminar de túneles de carretera en San Pedro Sula, Honduras, 2021 ya que, de ser utilizado como referencia para un proyecto vial de carácter público o privado, este estará bajo la aprobación y responsabilidad de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, actualmente conocida como la Secretaría de Infraestructura y Servicios Públicos (INSEP) desde el año 2014.

IV. METODOLOGIA

Después de lo expuesto en los capítulos anteriores, se procederá al capítulo IV que habla acerca de la metodología, la cual determina como se recopiló la información para la investigación. En este capítulo se establecerá el enfoque del estudio, así mismo las variables entorno a la formulación del problema y los objetivos específicos. También, se indicarán las técnicas e instrumentos utilizados en el proceso, la población y la muestra que generan información de valor y, por último, las actividades realizadas para el desarrollo de la investigación. (Sampieri, 2014)

4.1. ENFOQUE

Se estableció que la investigación posee un enfoque mixto, ya que cuenta con los dos tipos: el cuantitativo y el cualitativo. Se presenta el enfoque cuantitativo debido a que se basa en partir desde una idea la cual se va acortando hasta lograr determinarla, de esta misma se establecen los objetivos y las preguntas de investigación para definir el marco teórico. Al tener las preguntas de investigación, se procede a determinar las variables independientes y con métodos estadísticos se extraen sus conclusiones de los resultados numéricos. El enfoque cualitativo se basa en la recolección de datos y análisis de los mismos de una muestra establecida por el tema.

En el caso del contenido, el enfoque cuantitativo busca solventar la problemática del congestionamiento vial en ciertas zonas de la ciudad de San Pedro Sula y falta de conocimiento por parte de los ingenieros civiles mediante el diseño preliminar de túneles carreteros, los cuales se rigen por normativas, diseños y estudios existentes, también en base a la recolección de información mediante encuestas a los usuarios e ingenieros para satisfacer sus necesidades a través del enfoque cualitativo.

4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Entorno a la formulación del problema, se presenta la tabla de variables de operacionalización, la cual indica las variables independientes, que son las normativas, las necesidades del usuario, las recomendaciones y requerimientos del ingeniero civil, y el contenido del manual que es la variable dependiente de la investigación.

Tabla 1 - Variables de Operacionalización

Título	Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras				
Problema	Objetivo General	Preguntas de Investigación	Objetivos Específicos	Variable Independiente	Variable Dependiente
¿Qué normativas, procedimientos y detalles constructivos deberá integrar un manual de diseño preliminar para túneles de carretera, en función de las necesidades de los ingenieros civiles y usuarios en San Pedro Sula, Honduras, 2021?	Proponer un manual para el diseño preliminar de túneles de carretera en la ciudad de San Pedro Sula, mediante la centralización de la normativa estadounidense AASHTO y la normativa peruana MTC; para su implementación en proyectos viales subterráneos futuros.	1) ¿Qué ensayos in situ y de laboratorio se deben aplicar para determinar que zonas en San Pedro Sula cumplen con los requisitos geotécnicos para construir un túnel de carretera?	1) Identificar los ensayos in situ y de laboratorio a aplicar para determinar que zonas en San Pedro Sula cumplen con los requisitos geotécnicos para construir un túnel de carretera.	Ensayos para San Pedro Sula	Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras
		2) ¿Cuáles son las normativas nacionales e internacionales que brindan información con respecto a procedimientos, maquinaria y materiales requeridos para un túnel de carretera?	2) Indicar las normativas nacionales e internacionales necesarias para los procedimientos, la maquinaria y los materiales requeridos para un túnel carretero con sección típica.	Normativas	
		3) Según las exigencias constructivas de los ingenieros civiles en San Pedro Sula ¿Qué recomendaciones técnicas para el diseño preliminar de túneles carreteros con sección típica se abordarán en el manual?	3) Establecer las recomendaciones técnicas pertinentes, según las exigencias constructivas de los ingenieros civiles en San Pedro Sula, para el diseño preliminar de túneles carreteros con sección típica.	Recomendaciones técnicas	
		4) ¿Qué exigencias del usuario se deberán considerar para que el túnel carretero sea un espacio físico seguro y protegido?	4) Detallar las exigencias del usuario a considerarse en el diseño del túnel carretero para que sea un espacio físico seguro y protegido.	Exigencias del usuario	
		5) ¿Cuál será el contenido de relevancia y necesidad en el manual para el diseño preliminar de túneles de carretera con sección típica aplicado en la ciudad de San Pedro Sula?	5) Especificar el contenido de relevancia y necesidad comprendida en el manual para el diseño preliminar de túneles de carretera con sección típica en San Pedro Sula, Honduras.	Contenido de relevancia y necesidad	

Fuente: (Propia, 2021)

En conclusión, la Tabla 1 hace referencia al alcance de la investigación, es decir, por cada objetivo específico se indica una variable independiente, las cuales brindan una guía para la recopilación de información y de esta manera cumplir con los objetivos establecidos.

4.2.1. DIAGRAMA DE LAS VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se brinda el diagrama de las variables de investigación, este incluye las variables independientes mencionadas anteriormente, para cada una de ellas se les indica sus dimensiones correspondientes. Así mismo, la variable dependiente, la cual es el entregable.

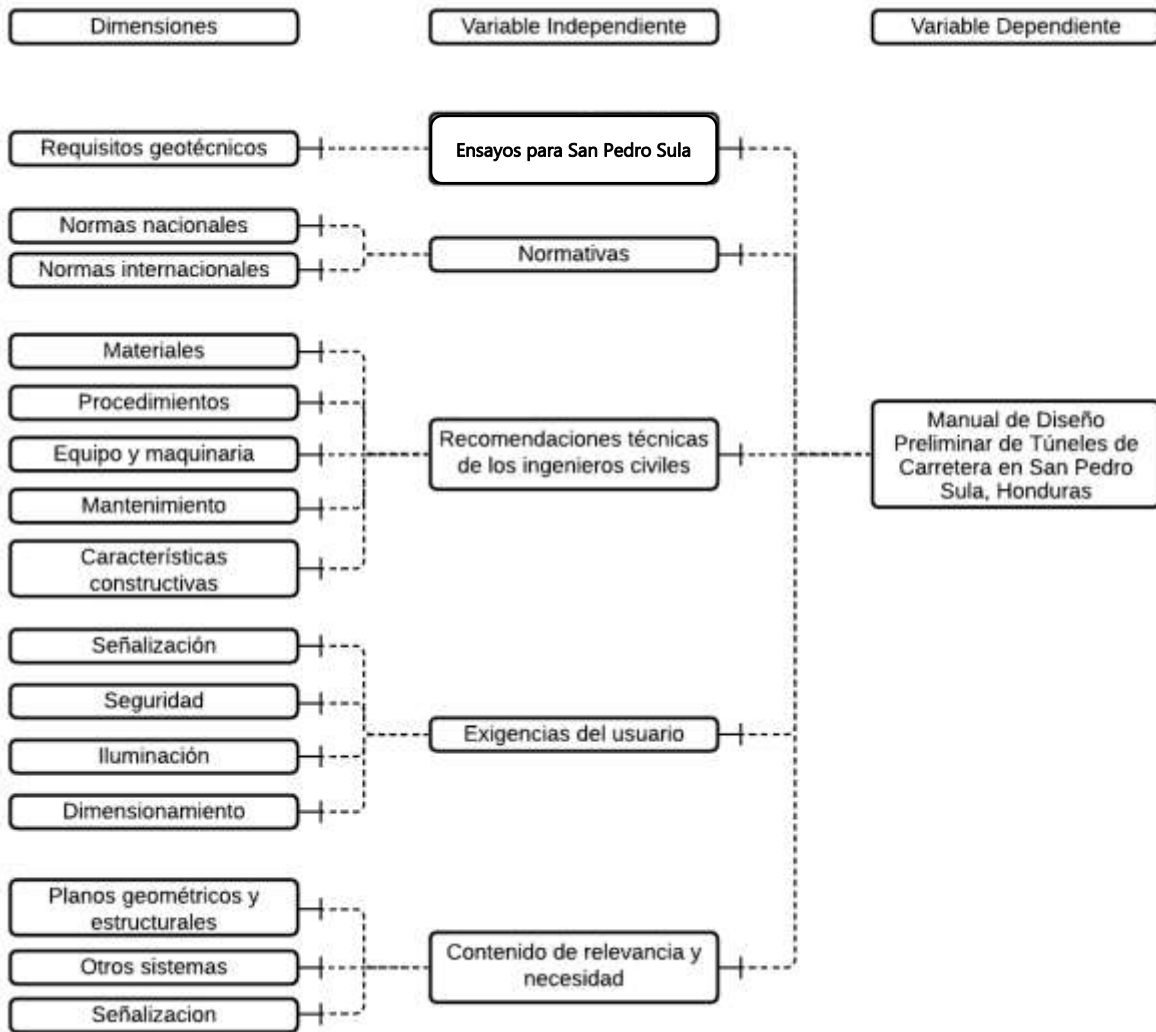


Ilustración 28 - Diagrama de las variables de operacionalización

Fuente: (Propia, 2021)

En conclusión, la ilustración 28 indica las variables de investigación con sus respectivas dimensiones, las cuales generan la información de valor necesaria y así dar como resultado la variable dependiente que en este caso es el entregable en forma de manual.

4.2.2. TABLA DE OPERACIONALIZACION

A continuación, se presenta la tabla de operacionalización, esta analiza las variables independientes establecidas con anterioridad, se brindan las definiciones conceptuales y operacionales, sus dimensiones, indicadores, ítems, unidades y escalas que han sido la base para el diseño y formulación del cuestionario a aplicar a la muestra.

En base a la Tabla 2, se concluye que cada una de las dimensiones establecidas con anterioridad contienen indicadores, cada uno de estos generan una pregunta para el desarrollo del cuestionario y así obtener toda la información necesaria para el entregable.

Tabla 2 - Tabla de Operacionalización

Título	Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras						
Variable Independiente	Definición		Dimensiones	Indicadores	Ítems	Unidades (Categorías)	Escala
	Conceptual	Operacional					
Ensayos para San Pedro Sula	Los sectores son parte de una ciudad, de un local o de cualquier otro lugar. Fuente: (RAE, 2021)	Estos representan las zonas de San Pedro Sula que cumplen con los requisitos geológicos y geotécnicos para su uso en el diseño del túnel.	Requisitos geotécnicos	Ensayos in situ	Actualmente la exploración geofísica ofrece una variedad amplia de métodos y modalidades, ¿Cuáles de los siguientes métodos considera útiles e imprescindibles	a) Métodos Sísmicos o (Sísmica de Refracción) o (Sísmica de Reflexión) o Otros: _____ b) Método Eléctricos o Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) o Calicatas Eléctricas o Dipolo-Dipolo o Potencial Natural o Métodos	X

Continuación Tabla 2...

					<p>en la construcción de un túnel carretero ?</p>	<p>Gravimétricos o Métodos Magnéticos o Métodos Electromagnéticos de Alta Frecuencia o Otros: _____ _____</p>	
					<p>Existe una vasta cantidad de ensayos in situ para la recopilación de información física real del material en el subsuelo. ¿Cuáles de los siguientes ensayos in situ permiten determinar las características geotécnicas más</p>	<p>o Sondeos mecánicos o Ensayo de penetración estándar (SPT) o Ensayo presiométrico (ptm) o Ensayo de molinete o Ensayo Piezométrico o Ensayo de permeabilidad Lefranc o Otros: _____ _____</p>	X

Continuación Tabla 2...

					importantes del terreno?		
				Ensayos de laboratorio	¿Cuáles de los siguientes ensayos en laboratorio son necesarios para la identificación de las propiedades del suelo y su resistencia a cargas?	Parámetros de resistencia o Ensayo triaxial o Ensayo resistencia a la compresión uniaxial o Ensayo de corte directo o Otros: _____ — Ensayos de identificación o Análisis granulométrico o Límites de Atterberg o Peso específico o Humedad y Absorción o Lámina Delgada (Mineralógica y Petrográfica) o Otros: _____	X

Continuación Tabla 2...

Normativas	<p>Conjunto de normas aplicables a una determinada actividad.</p> <p>Fuente: (RAE, 2021)</p>	<p>Estas representan las regulaciones técnicas que se aplicarán en el desarrollo del diseño preliminar de un túnel carretero</p>	<p>Normas nacionales</p>	<p>Diseño geométrico y estructural</p>	<p>¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen el diseño geométrico y el diseño estructural de túneles carreteros?</p>	<p>Respuesta breve</p>	X
				<p>Procedimientos, materiales y maquinaria</p>	<p>¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen los procedimientos</p>	<p>Respuesta breve</p>	

Continuación Tabla 2...

					a realizar, los materiales a emplear y la maquinaria a utilizar en la construcción de túneles carreteros?		
				Otros sistemas	¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen la iluminación, la señalización, el sistema hidráulica y el sistema eléctrico de túneles carreteros?	Respuesta breve	
			Normas internacionales	Diseño geométrico y estructural	¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales	Respuesta breve	X

Continuación Tabla 2...

					s internaci onales rigen el diseño geométri co y el diseño estructur al de túneles carretero s?		
				Procedimient os, materiales y maquinaria	¿Qué normativ as, guías técnicas y/o manuale s internaci onales rigen los procedi mientos a realizar, los materiale s a emplear y la maquina ria a utilizar en la construc ción de túneles carretero s?	Respuesta breve	

Continuación Tabla 2...

				Otros sistemas	¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales internacionales rigen la iluminación, la señalización, el sistema hidráulico y el sistema eléctrico de túneles carreteros?	Respuesta breve	
Recomendaciones técnicas	Es un conjunto de sugerencias con un grado de tecnicidad las cuales orientan a un profesional en el desarrollo de una acción.	Estas representan las directrices con cierto nivel de tecnicidad, las cuales se emplearán en el desarrollo del presente proyecto, según las exigencias de los ingenieros civiles en San Pedro Sula.	Materiales	Materiales	En base a su experiencia y considerando la disponibilidad, las metodologías, transporte y mantenimiento de estos materiales, ¿Qué material considera es el adecuado o a	o Madera o Acero o Concreto o Otros:_____	X

Continuación Tabla 2...

					utilizar en un túnel carretero ?		
			Procedimientos	Técnicas constructivas	Según el material seleccionado anteriormente, ¿Qué técnicas constructivas se recomiendan aplicar en la construcción de un túnel carretero ?	Respuesta breve	X
			Equipo y maquinaria	Tipo de maquinaria y equipo	En función de las técnicas constructivas que mencionó anteriormente, ¿Qué equipo y maquinaria considera sean requeridos para el desarrollo	Respuesta breve	X

Continuación Tabla 2...

					o de un túnel carretero ?		
			Mantenimiento	Tiempo	¿A cada cuanto considera usted se le debería dar mantenimiento a este tipo de obra civil?	o 3 meses o 6 meses o 1 año o 3 años o Otro: _____	X
			Características constructivas	Dimensiones	¿Cuál es el ancho mínimo de un carril para un túnel carretero ?	o 5.50 metros o 5.75 metros o 6.00 metros o 6.50 metros o Otro: _____	X
					¿Cuál es el ancho mínimo de la vereda (acera) para un túnel carretero ?	o 1.00 metro o 1.30 metros o 1.50 metros o 1.80 metros o Otro: _____	X
					¿Cuál es la altura mínima de galibo para un túnel	o 5.50 metros o 5.75 metros o 6.00 metros	X

Continuación Tabla 2...

					carretero ?	o 6.50 metros o Otro: _____	
					¿Cuántos carriles cree usted que son necesari os en un túnel carretero ?	o 1 carril o 2 carriles o Otro:_____	X
					En su opinión, ¿Cuál es el vehículo más pesado y/o grande que debe de tomarse en cuenta para diseñar un túnel carretero ?	o Camión o Autobús o Otro: _____	X
Exigencias del usuario	Son requerimie ntos o necesidade s imprescindi bles, provenient es del	Estas exigencias representan los requerimient os del usuario, para que la obra civil sea	Señaliz ación	Tipo de señalización	¿Conside ra adecuad a la señalizac ión horizont al y vertical	o Si o No, justifique: _____	X

Continuación Tabla 2...

	usuario, para que se realice una acción según su demanda.	eficiente y segura.			utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle?		
			Seguri dad	Carriles	¿Cuántos carriles cree usted que son necesari os en un túnel carretero ?	o 1 carril o 2 carriles o 3 carriles	X
					¿Conside ra que el túnel de la 27 y 28 calle debió incluir un carril de emergen cia?	o Si o No, justifique: _____	X
				Caso de emergencia	¿Conside ra necesari o un teléfono de emergen cia como el que esta mostrad o en la imagen?	o Si o No, justifique: _____	X
			Ilumina ción	Iluminación nocturna	¿Conside ra adecuada a la iluminaci ón	o Si o No, justifique: _____	X

Continuación Tabla 2...

					nocturna utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle?		
				Iluminación diurna	¿Considera adecuada a la iluminación diurna utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle?	o Si o No, justifique: _____	X
			Dimensionamiento	Ancho de carril	¿Considera cómodo y seguro el ancho de carril del túnel de la 27 y 28 calle?	o Si o No, justifique: _____	X
				Altura	¿Le parece adecuada a la altura del túnel de la 27 y 28 calle?	o Si o No, justifique: _____	X
Contenido de relevancia y necesidad	Es la coherencia de tópicos seleccionados o minuciosamente, que permiten a	Este representa los tópicos de valor que se deberán añadir en el manual, para que el lector	Planos geométricos y estructurales	Detalles geométricos	¿Qué detalles geométricos son imprescindibles y en que escala se	Respuesta breve	X

Continuación Tabla 2...

	un documento ser considerado o útil, confiable y de valor para el lector.	lo considere útil, confiable, relevante, necesario y de valor.			deberán presentarse en los planos?		
				Detalles estructurales	¿Qué detalles estructurales son imprescindibles y en que escala se deberán presentarse en los planos?	Respuesta breve	X
				Plantas	¿Cuántos metros debe abarcar una planta del túnel y en que escala se deberán presentarse en los planos?	Respuesta breve	X
				Cortes	¿Cuántos metros debe abarcar un corte longitudinal y en que escala se deberán presentarse en los planos?	Respuesta breve	X

Continuación Tabla 2...

					¿A cada cuanto se debe realizar un corte transversal y en que escala se deberán presentar en los planos?	Respuesta breve	X
				Otros	¿Qué otro tipo de planos considera son necesarios en un manual para el diseño preliminar de un túnel carretero?	Respuesta breve	X
			Otros sistemas	Eléctrico	¿Qué es lo más importante a detallar del sistema eléctrico en un túnel carretero y en que escala se deberán presenta	Respuesta breve	X

Continuación Tabla 2...

					r en los planos?		
				Hidráulico	¿Qué es lo más importante a detallar del sistema hidráulico en un túnel carretero y en que escala se deberán presentar en los planos?	Respuesta breve	X
			Señalización	Señalización horizontal	¿Qué detalles de señalización horizontal son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos?	Respuesta breve	X
				Señalización vertical	¿Qué detalles de señalización vertical son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos?	Respuesta breve	X

Continuación Tabla 2...

					ndibles y en que escala se deberán presenta r en los planos?		
--	--	--	--	--	--	--	--

4.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

A continuación, se presentan los instrumentos y técnicas utilizados para el desarrollo de la investigación, como ser el conjunto de softwares, sistemas de redacción, modelo del cuestionario, entrevistas realizadas, reuniones y las revisiones bibliográficas.

4.3.1. INSTRUMENTOS

Encuesta

“Conjunto de preguntas tipificadas dirigidas a una muestra representativa de grupos sociales, para averiguar estados de opinión o conocer otras cuestiones que les afectan” (ASALE & RAE, 2020, párr. 1).

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Este es un cuestionario dirigido a los transeúntes de San Pedro Sula a fin de desarrollar un manual que sirva como referencia para el diseño e implementación de túneles carreteros con sección típica en la ciudad. Los túneles son estructuras que atraviesan grandes cuerpos de tierra o de agua con el fin de permitir el paso seguro de los vehículos y de personas de un punto a otro. Muchos países en América Latina aplican la metodología de construcción de túneles como medida para aliviar el tránsito vehicular en zonas de alto congestionamiento y también para reducir accidentes en las carreteras.

*Obligatorio

Entrada al túnel de la 27 calle, junto al supermercado La Colonia y el Hospital CEMESA, en la salida sur de San Pedro Sula camino a Villanueva.



1. ¿Ha transitado por el túnel ubicado entre la 27 y 28 calle, en el bulevar del sur, en la ciudad de San Pedro Sula? *

Marca solo un óvalo.

Sí

No.

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

- 2. Independientemente de su respuesta a la anterior pregunta, ¿Considera adecuada la señalización horizontal y vertical utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle? *



Marca solo un óvalo.

- Sí Ir a la pregunta 4
- No Ir a la pregunta 3

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

3. Justifique su respuesta. *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Seguridad

4. ¿Cuántos carriles cree usted que son necesarios en un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- 1 carril
- 2 carriles
- Otros: _____

5. ¿Cuál considera usted es el ancho mínimo de un carril para un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- 3.50 metros
- 4.75 metros
- 5 metros
- 5.50 metros
- Otros: _____

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Seguridad

6. Como forma de prevenir accidentes, ¿Considera que el túnel de la 27 y 28 calle debió incluir un carril de emergencia? *



Marca solo un óvalo.

- Sí Ir a la pregunta 7
- No Ir a la pregunta 8

7. ¿Cuál considera debería de ser el ancho mínimo de un carril de emergencia para un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- 4 metros
- 4.50 metros
- 5 metros
- Otros: _____

Ir a la pregunta 9

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Seguridad

8. Justifique su respuesta. *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Seguridad

9. En el caso de que se construyan mas obras semejantes a esta en el futuro, ¿Considera necesario la instalación de un teléfono de emergencia como el que esta mostrado en la imagen? *



Marca solo un óvalo.

- Si *Ir a la pregunta 11*
- No *Ir a la pregunta 10*

10. Justifique su respuesta. *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Iluminación

11. ¿Considera adecuada la iluminación nocturna utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle? *



Marca solo un óvalo.

- Sí Ir a la pregunta 13
- No Ir a la pregunta 12

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Iluminación

12. Justifique su respuesta. *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Iluminación

13. ¿Considera adecuada la iluminación diurna utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle? *



Marca solo un óvalo.

- Sí Ir a la pregunta 15
- No Ir a la pregunta 14

Iluminación

14. Justifique su respuesta. *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Dimensionamiento

15. ¿Considera cómodo y seguro el ancho de carril del túnel de la 27 y 28 calle? *

Marca solo un óvalo.

Sí Ir a la pregunta 17

No Ir a la pregunta 16

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Dimensionamiento

16. Justifique su respuesta. *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Dimensionamiento

17. ¿Le parece adecuada la altura del túnel de la 27 y 28 calle? *

Marca solo un óvalo.

Sí Ir a la pregunta 19

No Ir a la pregunta 18

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Dimensionamiento

18. Justifique su respuesta. *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Opinión

19. ¿Cree usted que la constante implementación de este tipo de obras (túneles carreteros) ayudaría a solucionar muchos de los problemas viales que actualmente se experimentan en la ciudad, como lo puede ser el tráfico vehicular excesivo? *



Marca solo un óvalo.

- Sí Ir a la pregunta 21
 No Ir a la pregunta 20

20. Justifique su respuesta. *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Opinión

21. Tomando como referencia el túnel de la 27 y 28 calle, ¿Dónde considera usted se deberían de implementar mas túneles semejantes a este en la ciudad de San Pedro Sula? *

Google no creó ni aprobó este contenido.

Google Formularios

Ilustración 29 – Encuesta de investigación dirigida a los habitantes de San Pedro Sula

Fuente: (Propia, 2021)

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Este es un cuestionario dirigido a los ingenieros civiles que residen en San Pedro Sula a fin de desarrollar un manual que sirva como referencia para el diseño e implementación de túneles carreteros con sección típica en la ciudad. Los túneles son estructuras que atraviesan grandes cuerpos de tierra o de agua con el fin de permitir el paso seguro de los vehículos y de personas de un punto a otro. Muchos países en América Latina aplican la metodología de construcción de túneles como medida para aliviar el tránsito vehicular en zonas de alto congestionamiento y también para reducir accidentes en las carreteras.

*Obligatorio

Ejemplo de un Túnel Carretero con Sección Semicircular



1. ¿Cómo ingeniero civil, cual es la especialidad/campo de trabajo a la que pertenece? *

Marca solo un óvalo.

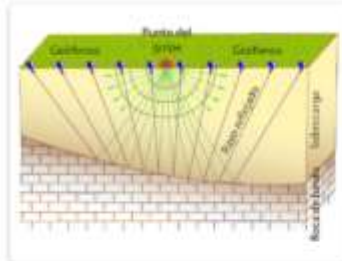
- Carreteras
- Hidraulica
- Estructural
- Geologia
- Project Manager
- Otros: _____

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Requisitos Geotécnicos

2. Actualmente la exploración geofísica ofrece una variedad amplia de métodos y modalidades. ¿Cuáles de los siguientes métodos considera útiles e imprescindibles en la construcción de un túnel carretero? (Puede elegir mas de uno) *

Selecciona todas las opciones que correspondan.



Sísmica de Refracción



Sísmica de Reflexión



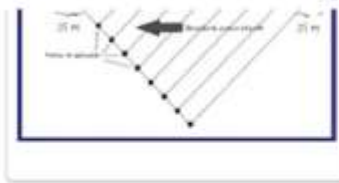
Sondos Eléctricos Verticales (SEV)



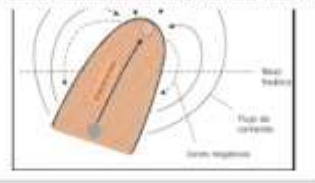
Galíatas Eléctricas



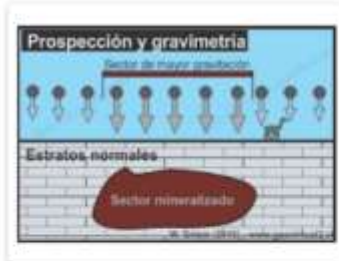
https://docs.google.com/forms/d/16Vnk_BiqXUHEFokafuQUJWAKZSD3UFe0j0Htyvq#cid9f



Método Dipolo-Dipolo



Potencial Natural

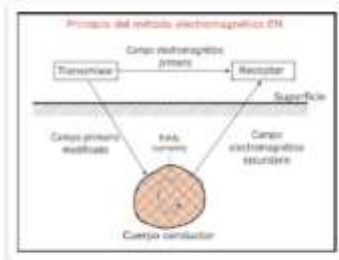


Métodos Gravimétricos



Métodos Magnéticos

Otros: _____



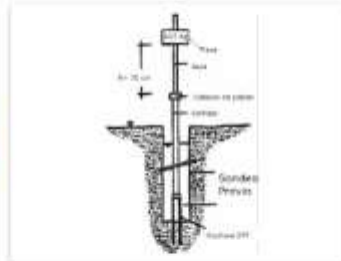
Métodos Electromagnéticos de Alta Frecuencia

3. Existe una vasta cantidad de ensayos in situ para la recopilación de información física real del material en el subsuelo, ¿Cuáles de los siguientes ensayos in situ permiten determinar las características geotécnicas más importantes del terreno? (Puede elegir mas de uno) *

Selecciona todas las opciones que correspondan.



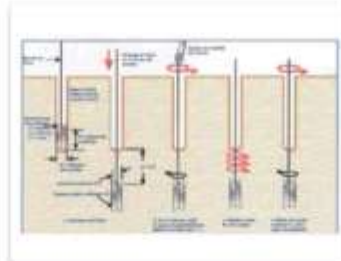
Sondeos mecánicos



Ensayo de Penetración Estándar (SPT)



Ensayo Presiométrico (PTM)



Ensayo de molinete



https://docs.google.com/forms/d/16Vnk_BiqXUteEokafuQUJWnkZSD3UFe0j0Hyyq#oid

7/20

7/12/21 11:42

Manual de Diseño Preliminar de Tánques de Carretera en San Pedro Sula, Honduras



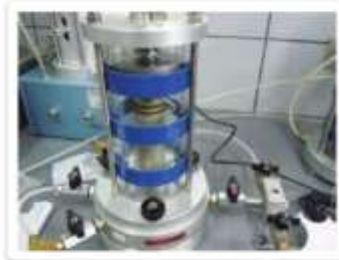
Ensayo Piezométrico

Ensayo de permeabilidad Lefranc

Otros: _____

4. ¿Cuáles de los siguientes ensayos en laboratorio son necesarios para la identificación de las propiedades del suelo y su resistencia a cargas? (Puede elegir mas de uno) *

Selecciona todas las opciones que correspondan.



Ensayo triaxial



Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial



Ensayo de corte directo



Análisis granulométrico



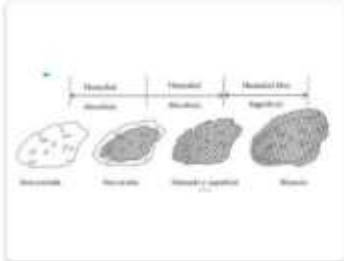
https://docs.google.com/forms/d/16Vnk1_BqXUHEFokafuQJOWNKZSD3UFe0j0Hyyq78ciw9t



Límites de Atterberg



Peso específico



Humedad y Absorción



Lamina Delgada (Mineralógica y Petrográfica)

Otros: _____

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Normas nacionales

5. ¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen el diseño geométrico y el diseño estructural de túneles carreteros? *

6. ¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen los procedimientos a realizar, los materiales a emplear y la maquinaria a utilizar en la construcción de túneles carreteros? *

7. ¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen la iluminación, la señalización, el sistema hidráulica y el sistema eléctrico de túneles carreteros? *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Normas internacionales

8. ¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales internacionales rigen el diseño geométrico y el diseño estructural de túneles carreteros? *

9. ¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales internacionales rigen los procedimientos a realizar, los materiales a emplear y la maquinaria a utilizar en la construcción de túneles carreteros? *

10. ¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales internacionales rigen la iluminación, la señalización, el sistema hidráulica y el sistema eléctrico de túneles carreteros? *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Materiales

11. En base a su experiencia y considerando la disponibilidad, las metodologías, transporte y mantenimiento de estos materiales, ¿Qué material considera es el adecuado a utilizar en un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- Madera
- Acero
- Concreto
- Otros: _____

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Procedimientos

12. Según el material seleccionado anteriormente, ¿Qué técnicas constructivas se recomiendan aplicar en la construcción de un túnel carretero? *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Equipo y maquinaria

13. En función de las técnicas constructivas que mencionó anteriormente, ¿Qué equipo y maquinaria considera sean requeridos para el desarrollo de un túnel carretero? *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Mantenimiento

14. ¿Cada cuanto considera usted se le debería dar mantenimiento a este tipo de obra civil? *

Marca solo un óvalo.

3 meses

6 meses

1 año

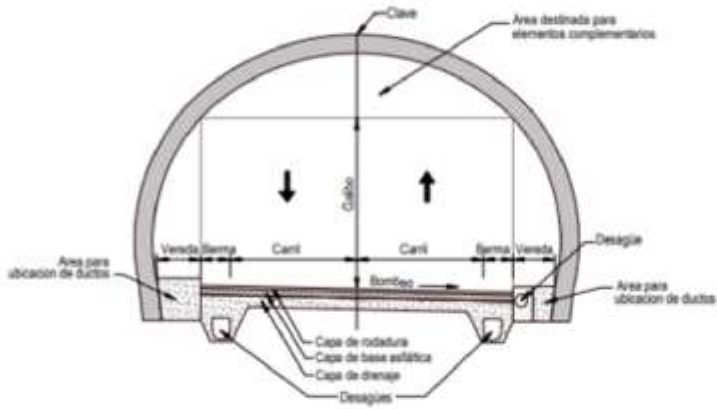
3 años

Otros: _____

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Características constructivas

Dimensiones básicas de un túnel carretero



15. En base a sus conocimientos,  Cu l considera es la sección típica mas adecuada para un túnel carretero? *

Marca solo un  valo.



Semicircular



Rectangular

Ambos

16. ¿Cuántos carriles considera usted que son necesarios en un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- 1 carril
 2 carriles
 Otros: _____

17. ¿Cuál considera usted es el ancho mínimo de un carril para un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- 3.50 metros
 4.75 metros
 5 metros
 5.50 metros
 Otros: _____

18. ¿Cuál considera usted es el ancho mínimo de la vereda (acera) para un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- 1 metro
- 1.30 metros
- 1.50 metros
- 1.80 metros
- Otros: _____

19. ¿Cuál considera usted es la altura mínima de galbo para un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- 5.50 metros
- 5.75 metros
- 6 metros
- 6.50 metros
- Otros: _____

20. En su opinión, ¿Cuál es el vehículo más pesado y/o grande que debe de tomarse en cuenta para diseñar la sección geométrica de un túnel carretero? *

Marca solo un óvalo.

- Camión
 Autobús
 Otros: _____

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula,
Honduras

Planos geométricos y
estructurales

21. ¿Qué detalles geométricos son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos? *

22. ¿Qué detalles estructurales son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos? *

23. ¿Cuántos metros debe abarcar una planta del túnel y en que escala se deberán presentar en los planos? *

24. ¿Cuántos metros debe abarcar un corte longitudinal y en que escala se deberán presentar en los planos? *

25. ¿A cada cuanto se debe realizar un corte transversal y en que escala se deberán presentar en los planos? *

26. ¿Qué otro tipo de planos considera son necesarios en un manual para el diseño preliminar de un túnel carretero? *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

Otros sistemas

27. ¿Qué es lo más importante a detallar del sistema eléctrico en un túnel carretero y en que escala se deberán presentar en los planos? *

28. ¿Qué es lo más importante a detallar del sistema hidráulico en un túnel carretero y en que escala se deberán presentar en los planos? *

Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras

29. ¿Qué detalles de señalización horizontal son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos? *

30. ¿Qué detalles de señalización vertical son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos? *

Google no creó ni aprobó este contenido.

Google Formularios

Ilustración 30 – Encuesta de investigación dirigida a los ingenieros civiles

Fuente: (Propia, 2021)

Microsoft Word

“Es un programa de procesamiento de texto, diseñado para ayudarle a crear documentos de calidad profesional. Con las mejores herramientas de formato de documento, Word le ayuda a organizar y escribir los documentos de forma más eficiente” (Microsoft, 2013, párr. 1).

Microsoft Excel

“Es un programa de hojas de cálculo que permite realizar cálculos, contiene herramientas de gráficos, tablas dinámicas y soporte para lenguajes de programación de macros, compatibles con los sistemas operativos de Windows y Mac” (Microsoft, 2021, párr. 4).

Microsoft PowerPoint

“Es un potente software de presentación desarrollado por Microsoft. Es probablemente la herramienta más popular a la hora de hacer presentaciones, por lo que es usado en todo el mundo, por empresas grandes y pequeñas” (APEN, 2020, párr. 1).

Microsoft Project

“Es un software diseñado por Microsoft y usado por millones de colaboradores, administradores y jefes de proyectos. Tiene diversas funciones, cada una de ellas asignadas para dar seguimiento a procesos, gestionar presupuestos, evaluar ritmos y cargas laborales, asignar recursos, desarrollar planes y más” (ESAN, 2018, párr. 2).

Google

“Es la página web más popular del mundo y el motor de búsqueda más utilizado a nivel mundial. Se trata de una organización subsidiaria de la multinacional americana Alphabet Inc, que gira en torno al popular motor de búsqueda de la empresa” (ConceptoDefinición, 2021, párr. 1)

Google Meet

“Es la aplicación de videoconferencias de Google, para navegadores web y dispositivos móviles, enfocada al entorno laboral y que sustituye a Google Hangouts, dentro de G-Suite, el pack de aplicaciones de Google para profesionales” (Vicent, 2020, párr. 1).

Google Forms

“Es un programa que nos trae Google y que nos permite fácilmente crear y publicar formularios, útiles para encuestas, exámenes, asistencias a cursos o capacitaciones y mucho más, permitiéndonos también ver los resultados de manera gráfica” (Guzmán, 2021, párr. 1).

Civil 3D

“Es un software de diseño de ingeniería civil que admite BIM (Building Information Modeling) con funciones integradas para mejorar el dibujo, el diseño y la documentación de construcción” (es.BIM, 2020, párr. 1).

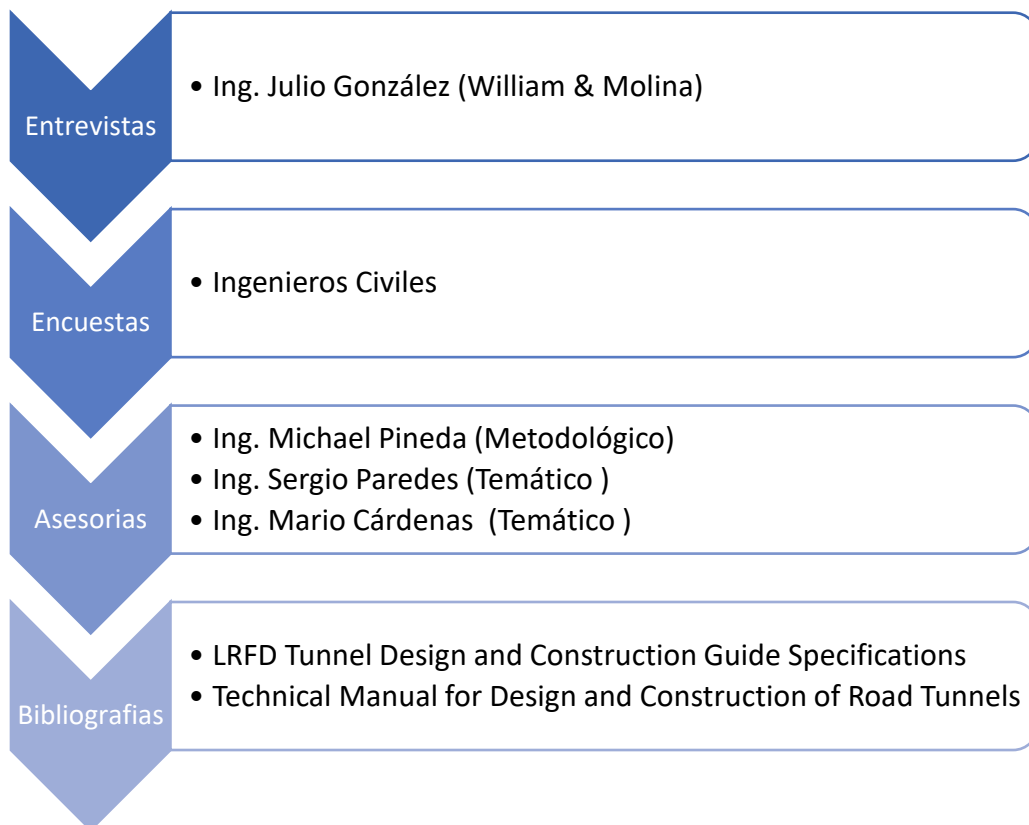
Canva

“Es una web de diseño gráfico y composición de imágenes para la comunicación fundada en 2012, y que ofrece herramientas online para crear tus propios diseños, tanto si son para ocio como si son profesionales” (Fernández, 2020, párr. 3).

Blackboard

“Es una plataforma educativa que utiliza una conexión a Internet para brindar acceso a los cursos desde un lugar remoto, de una manera flexible y sencilla para profesores y estudiantes con una cuenta institucional” (Méndez, 2014, párr. 1).

4.3.2. TECNICAS



La encuesta, la cual se realizó y se distribuyó por medio de la plataforma Google Forms, se hizo en base a los indicadores expuestos en la tabla de operacionalización con el fin de recabar la información necesaria para el desarrollo del entregable, dando respuesta a las preguntas de investigación. Dicha encuesta se dividió en dos, una dirigida a los habitantes de San Pedro Sula, y otra enfocada directamente hacia los ingenieros civiles, que nos brindaron su apoyo desde un punto de vista más técnico. Las asesorías también fueron una técnica fundamental, ya que los asesores nos ayudaron a darle forma a esta investigación.

La revisión bibliográfica de reglas, normas técnicas, y códigos fue necesaria para el desarrollo del manual que ayudaron a profundizar los temas en cuestión, asimismo, se tomaron de referencia proyectos realizados en otros países con resultados positivos que ponen en práctica el mismo concepto y proceso constructivo que se plantea realizar en la zona de estudio.

La entrevista al Ing. Julio Gonzales, encargado del área de pretensados en la constructora William y Molina en San Pedro Sula, se realizó con el propósito de obtener información valiosa en el tema de túneles carreteros. Estos fueron los puntos que se tocaron:

- Se comentó el ingenioso proceso de diseño para que el túnel funcionara correctamente. Con factores importantes como el tiempo, el capital monetario y limitación de maquinaria, todos los ingenieros implicados en la construcción tenían el deber de cumplir todos estos requisitos. El túnel de la 27 y 28 calle se diseñó con todos los factores incluidos. Una de las problemáticas eran los nueve metros de excavación, y para esto se requirió aplicar la técnica tabla estacado. Pero los costos de esta técnica eran demasiado elevados, entonces recurrieron a las alternativas. Se basaron en un túnel construido en Austria que implemento, en vez de tabla estacado, perfiles metálicos y madera de manera intercalada con tablonés en la parte posterior que servirían de contención.
- En cuanto a la sección del túnel, se tomó como una rectangular por los costos. Explico que una sección tipo bóveda encarece la obra y el túnel con sección rectangular se mantenía dentro de las posibilidades de desarrollo en San Pedro Sula. Se diseñó con sección rectangular y de un solo carril por las limitaciones de las colindancias. Además, no había espacio para expandir a más carriles. Al igual, se mencionaron los diferentes métodos de construcción para

un túnel como el túnel perforado, tabla estacada y pilotes perforados de concreto armado. El método constructivo seleccionado fue el óptimo, así como su diseño estructural realizado por el Ing. Mario Cárdenas. Estaban a disposición todos los materiales y equipo mecánico para realizarlo, como se conoce en campo "a la vieja escuela".

- Relatando más sobre la construcción de túneles, el Ing. Gonzales especifico a los ingenieros más importantes que deben de dirigir una obra de este calibre: un hidrólogo, un estructuralista, un geotécnico, un diseñador geométrico y coordinador que lidera el desarrollo de la obra civil. El hidrólogo analiza toda la información hídrica histórica que impacta el túnel, como es el nivel freático. El geotécnico examina de los esfuerzos del grupo de pilotes utilizados en el túnel, por medio de programas, e incluso las deformaciones y capacidad de carga del suelo. Básicamente, ayuda a predimensionar los pilotes aptos para el muro de contención.
- Un tema imprescindible para el diseño de un túnel carretero, y es lo primero a desarrollarse en la construcción: el drenaje. El cómo se evacuarán las aguas para que no ocurra una inundación. Esto con la ayuda del levantamiento topográfica para identificar las zonas de evacuación, después es cuando inicia la excavación. Ya sea por la precipitación o por existencia de nivel freático, siempre saldrá el agua por el drenaje. Se avanzó con la fundición de zapatas y muros de contención, luego de la excavación. Un factor muy importante es que los pilotes hincados solo se pudieron realizar con suelo arenoso, esa fue la ventaja de tener arena. El Ing. Gonzales recomienda diseñar y construir en base a la maquinaria disponible en la ciudad, que exista mano de obra altamente calificada para manejar la maquinaria (optimizar los recursos).

4.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

A continuación, se presenta la población y la muestra a alcanzar para el desarrollo de la investigación, estableciendo el tamaño, el nivel de confiabilidad y los parámetros que esta debe tener para generar valor a los resultados.

4.4.1. POBLACIÓN

La población seleccionada para esta investigación se basa en los expertos en el rubro de la construcción como ser ingenieros civiles que tengan alguna experiencia en proyectos viales.

4.4.2. TAMAÑO DE LA MUESTRA

El tamaño de la muestra se estableció como no probabilística y se determinó a través de la ecuación que se presenta a continuación:

$$n = \frac{Z^2_c \cdot p \cdot q}{e^2}$$

Ecuación 6 - Muestra no probabilística

Fuente: (Sampieri, 2014)

En la Ecuación 6 se establecen las siguientes variables:

z= porcentaje de confiabilidad (1.65)

p= probabilidad de ocurrencia (0.5)

q= probabilidad de no ocurrencia (0.5)

e= error (0.1)

Los parámetros de la muestra que se consideraron para que el encuestado sea una fuente útil para la investigación es que sean los mismos habitantes de la ciudad de San Pedro Sula. El resultado de la Ecuación 6 dio como mínimo a un total de 69 habitantes a encuestar y como recomendación encuestar a un mínimo de tres ingenieros expertos.

4.5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La metodología de estudio de la investigación, como se mencionó anteriormente, es un enfoque mixto, el cual posee ambos, el cualitativo y el cuantitativo.

4.5.1. TIPO DE DISEÑO

En este apartado se presenta la Ilustración 31, la cual consiste en el diagrama de diseño de la investigación con respecto al enfoque brindado anteriormente:

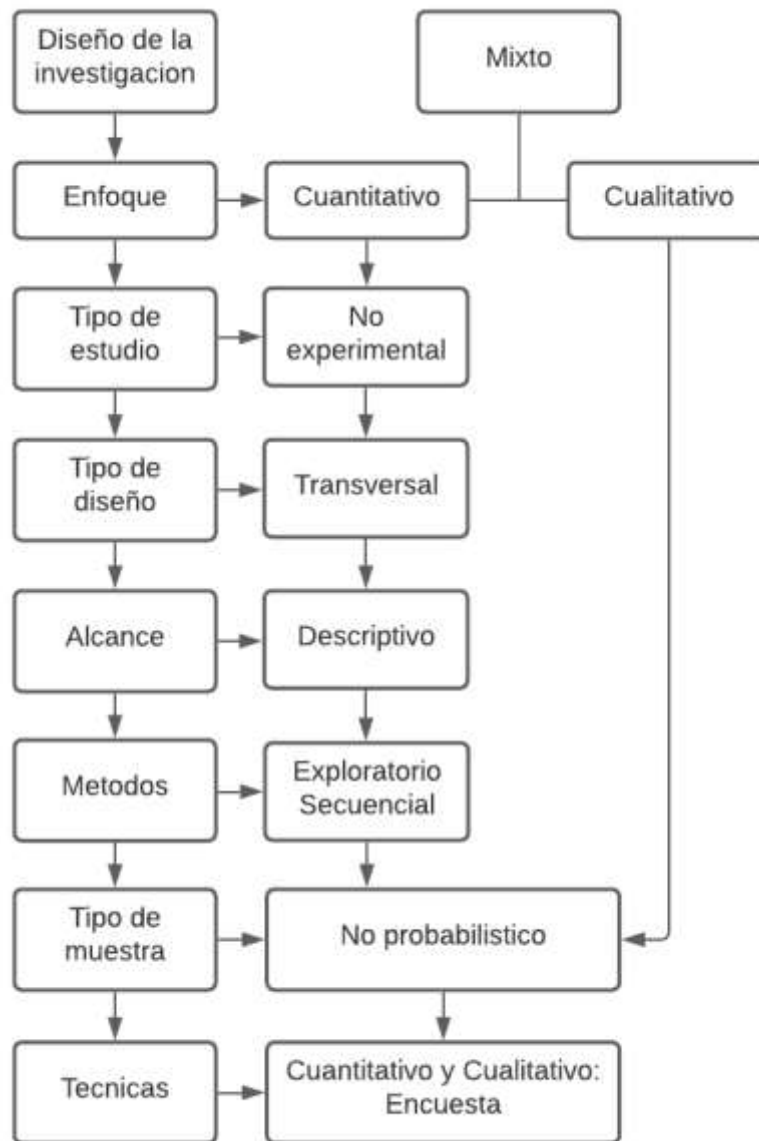


Ilustración 31 - Diagrama del diseño de la investigación

Fuente: (Propia, 2021)

Con respecto a la Ilustración 31, se muestra el enfoque, tipo de estudio, tipo de diseño, alcance, métodos, tipos de muestra y técnicas utilizadas en el desarrollo de la investigación.

Como se mencionó anteriormente, el enfoque del estudio es mixto, ya que contiene ambas características cualitativas y cuantitativas por su recopilación de datos y análisis para solventar la problemática y alcanzar los objetivos establecidos.

El tipo de estudio es no experimental debido a que en el desarrollo de la investigación no se generan ni se manipulan variables o situaciones, como Sampieri (2014) afirma: "En la investigación no experimental las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre dichas variables ni se puede influir en ellas, porque ya sucedieron, al igual que sus efectos" (p. 152).

El tipo de diseño es transversal ya que se evalúan ciertos aspectos en un punto del tiempo, como ser una situación, comunidad o un evento. Sampieri (2014) afirma: "En estos casos el diseño apropiado (con un enfoque no experimental) es el transversal o transeccional. Ya sea que su alcance inicial o final sea exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo" (p. 154).

Se definió el alcance de la investigación como descriptivo ya que se considera un estudio, se miden sus conceptos y por consiguiente se definen sus variables. Sampieri (2014) afirma: "Únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren" (p. 92).

El método se definió como diseño exploratorio secuencial o DEXPLOS debido a que la recolección y análisis de datos tienen un enfoque mixto. Sampieri (2014) afirma: "El diseño implica una fase inicial de recolección y análisis de datos cualitativos seguida de otra donde se recaban y analizan datos cuantitativos" (p. 551).

Debido a que se desconoce la población existente de ingenieros civiles en San Pedro Sula que actualmente están activos, se estableció el tipo de muestra como no probabilística. Por último, las técnicas empleadas a la muestra mencionada anteriormente son encuestas de opinión y entrevistas ya que estas son las más apropiadas al momento de desarrollar una investigación con un tipo de estudio no experimental.

4.6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

A continuación, se presenta la Ilustración 32 que corresponde al cronograma de actividades que abarca el desarrollo del proyecto de investigación desde semana 1 hasta semana 10 donde se estima que se finalizara la investigación.

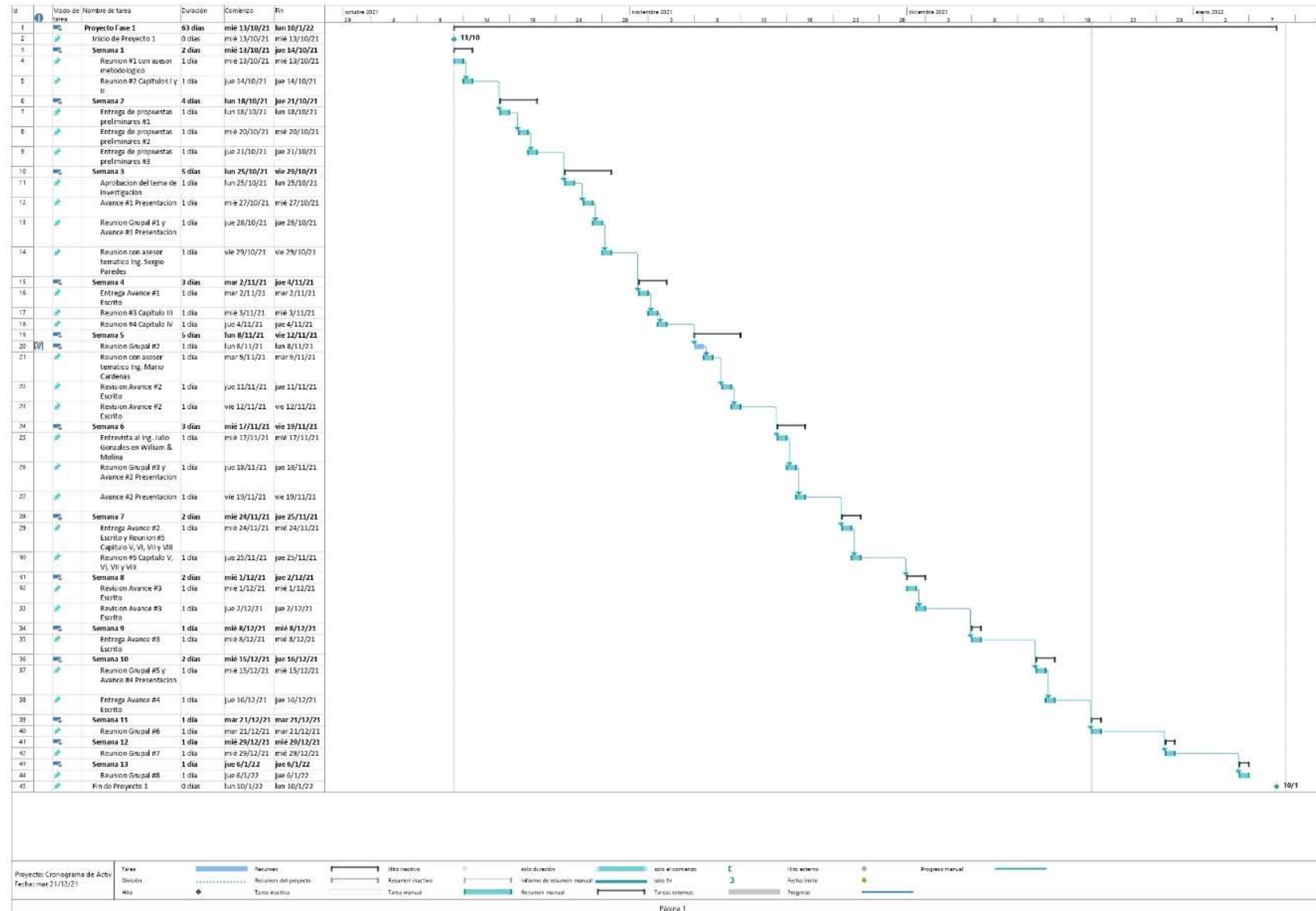


Ilustración 32 - Cronograma de actividades

Fuente: (Propia, 2021)

En conclusión, la Ilustración 32 contiene las actividades realizadas con su respectivo tiempo invertido para la creación y desarrollo del documento de investigación junto con el entregable a presentar a finales del periodo académico Q4 2021.

Miércoles 13 de octubre del 2021 – Reunión #1 con asesor metodológico

Se realizó la primera reunión con el asesor metodológico por medio de la clase en línea para discutir los parámetros y lo que conlleva el documento de investigación.

Jueves 14 de octubre del 2021 – Reunión #2 Capítulos I y II

Se realizó la segunda reunión con el asesor metodológico por medio de la clase en línea para discutir el contenido que debería de llevar el capítulo I y II del documento.

Lunes 18 de octubre del 2021 – Entrega de propuestas preliminares #1

Se expusieron cuatro propuestas, todas fueron rechazadas por lo que se procedió a traer otras cuatro propuestas al siguiente día.

Miércoles 20 de octubre del 2021 – Entrega de propuestas preliminares #2

Se expusieron nuevamente cuatro propuestas, todas fueron rechazadas por lo que se optó por utilizar una de las propuestas restantes de uno de los grupos que ya tenía aprobado su tema de investigación, la idea para el proyecto giraba en torno al diseño de túneles carreteros.

Jueves 21 de octubre del 2021 – Entrega de propuestas preliminares #3

Posteriormente se llevó a cabo la presentación de la propuesta antes escogida de manera más profunda, quedando como la idea principal y se mandó al coordinador para su aprobación final.

Lunes 25 de octubre del 2021 – Aprobación del tema de investigación

Coordinación aprobó el tema de investigación dando luz verde a la búsqueda de información y al desarrollo del informe y el primer avance.

Miércoles 27 de octubre del 2021 a jueves 28 de octubre del 2021 – Reunión Grupal #1 y Avance #1 Presentación

Reuniones de equipo con respecto al primer avance de la investigación, preparando la presentación con los temas estipulados y posteriormente presentándolos en la clase virtual frente al asesor metodológico.

Viernes 29 de octubre del 2021 – Reunión con asesor temático Ing. Sergio Paredes

Primera reunión de asesoría con el Ing. Sergio Paredes con el fin de discutir el primer avance y aclarar dudas con respecto al tema de investigación.

Martes 2 de noviembre del 2021 – Entrega Avance #1 Escrito

Una vez finalizado el primer avance escrito, se entregó para una futura corrección por el asesor metodológico.

Miércoles 3 de noviembre del 2021 a jueves 4 de noviembre del 2021 – Reunión #3 y #4 Capítulo III y IV

Se realizó la tercera y cuarta reunión con el asesor metodológico por medio de la clase en línea para discutir el contenido que debería de llevar el capítulo III y IV del documento.

Lunes 8 de noviembre del 2021 – Reunión Grupal #2

Reuniones de equipo con respecto al segundo avance de la investigación, buscando información y proyectos referentes en el CRAI ubicado en el campus de San Pedro Sula.

Martes 9 de noviembre del 2021 – Reunión con asesor temático Ing. Mario Cárdenas

Segunda reunión de asesoría con el Ing. Mario Cárdenas con el fin de discutir el segundo avance y aclarar dudas con respecto al tema de investigación, haciendo énfasis sobre el diseño del túnel ubicado en la 27 y 28 calle, en el bulevar del sur, en San Pedro Sula.

Jueves 11 de noviembre del 2021 a viernes 12 de noviembre del 2021 – Revisión Avance #2 Escrito

Previo a la finalización y entrega del segundo avance escrito, se entregó una parte de vital importancia del documento para su corrección por el asesor metodológico, con el fin de avanzar en el desarrollo del mismo sin problemas.

Miércoles 17 de noviembre del 2021 – Entrevista al Ing. Julio Gonzales

Al querer tener la perspectiva de un experto, se llevó a cabo una entrevista con el Ing. Julio Gonzales, el cual es ingeniero civil y participo en el diseño y construcción del túnel carretero ubicado en la 27 y 28 calle del bulevar del sur en San Pedro Sula. Nos guío con respecto a la encuesta y los parámetros a considerar para hacer más intuitivo el instrumento.

Jueves 18 de noviembre del 2021 a viernes 19 de noviembre del 2021 – Reunión Grupal #3 y Avance #2 Presentación

Reuniones de equipo con respecto al segundo avance de la investigación, preparando la presentación con los temas estipulados y posteriormente presentándolos en la clase virtual frente al asesor metodológico.

Miércoles 24 de noviembre del 2021 a jueves 25 de noviembre del 2021 – Entrega Avance #2 y Reunión #5 Capitulo V, VI, VII, VIII y IX

Una vez finalizado el segundo avance escrito, se entregó para una futura corrección por el asesor metodológico, también se realizó la quinta y sexta reunión con el asesor metodológico por medio de la clase en línea para discutir el contenido que debería de llevar el capítulo V, VI, VII y VIII del documento.

Viernes 26 de noviembre del 2021 – Revisión Avance #3 Escrito

Previo a la finalización y entrega del tercer avance escrito, se entregó una parte de vital importancia del documento para su corrección por el asesor metodológico, con el fin de avanzar en el desarrollo del mismo sin problemas.

Miércoles 1 de diciembre del 2021 a jueves 2 de diciembre – Reunión Grupal #4 y Avance #3 Presentación

Reuniones de equipo con respecto al segundo avance de la investigación, preparando la presentación con los temas estipulados y posteriormente presentándolos en la clase virtual frente al asesor metodológico.

Miércoles 8 de diciembre del 2021 – Entrega Avance #3 Escrito

Una vez finalizado el tercer avance escrito, se entregó para una futura corrección por el asesor metodológico.

Miércoles 15 de diciembre del 2021 – Reunión Grupal #5 y Avance #4 Presentación

Reuniones de equipo con respecto al segundo avance de la investigación, preparando la presentación con los temas estipulados y posteriormente presentándolos en la clase virtual frente al asesor metodológico.

Jueves 16 de diciembre del 2021 – Entrega Avance #4 Escrito

Una vez finalizado el cuarto avance escrito, se entregó para una futura corrección por el asesor metodológico finalizando así la entrega de avances escritos previo a la terna.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El siguiente capítulo corresponde al análisis de resultados que desglosa la tabulación de los datos obtenidos a través de la aplicación del instrumento investigativo que se dividió en dos secciones, los resultados de los habitantes de la ciudad de San Pedro Sula, Honduras con sus respectivas conclusiones en base a sus respuestas, y los resultados de los ingenieros civiles quienes brindaron su punto de vista técnico y sus recomendaciones para el desarrollo del manual. En función de los resultados recopilados mediante las encuestas se estableció el contenido del manual, que se dividirá en 11 capítulos que son los siguientes: Capítulo 1: Generalidades, Capítulo 2: Estudios Geológicos – Geotécnicos, Capítulo 3: Clasificación Geomecánica, Capítulo 4: Sostenimiento y Revestimiento, Capítulo 5: Diseño Geométrico, Capítulo 6: Diseño Estructural, Capítulo 7: Señalización, Capítulo 8: Drenaje, Capítulo 9: Iluminación, Capítulo 10: Mantenimiento y el Capítulo 11: Planos.

5.1. TABULACIÓN DE CUESTIONARIOS

La metodología de estudio de la investigación A continuación, se presentan los resultados de los dos cuestionarios aplicadas, una dirigida a los habitantes de la ciudad de San Pedro Sula, especialmente a conductores y/o transeúntes, con un total de setenta y cuatro encuestados y otra hacia los ingenieros civiles, con un total de seis encuestados, estos últimos originarios de Honduras, pero siendo expertos en temáticas correspondientes a túneles, carreteras, obras subterráneas, entre otras.

Cabe mencionar que las gráficas de los resultados en la encuesta de los habitantes están señalizadas por las siglas H.S.P.S., que significa Habitantes de San Pedro Sula. Por otro lado, las gráficas que hacen referencia a la encuesta de los ingenieros están señalizadas por las siglas I.C.E., que significa Ingenieros Civiles Expertos.

5.1.1 CUESTIONARIO DIRIGIDO A LOS HABITANTES

La pregunta número uno indica: "¿Ha transitado por el túnel ubicado entre la 27 y 28 calle, en el bulevar del sur, en la ciudad de San Pedro Sula?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 33.



Ilustración 33 - Respuesta a la pregunta #1 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 33, se muestran los resultados con respecto a la primera pregunta, donde el porcentaje mayor, que es de 88%, revela que la mayoría de los usuarios en la capital industrial han transitado al menos una vez por el túnel de 27 y 28 calle, mientras que el 12% afirman que no han tenido la oportunidad. Lo anterior supone que la mayoría de los individuos contestarán las siguientes preguntas y las respuestas serán funcionales dado que ya han experimentado al menos una vez los beneficios que trae dicho túnel tanto a corto como a largo plazo.

La pregunta número dos indica: "Independientemente de su respuesta a la anterior pregunta, ¿Considera adecuada la señalización horizontal y vertical utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 34.

¿Esta de acuerdo con la señalización?

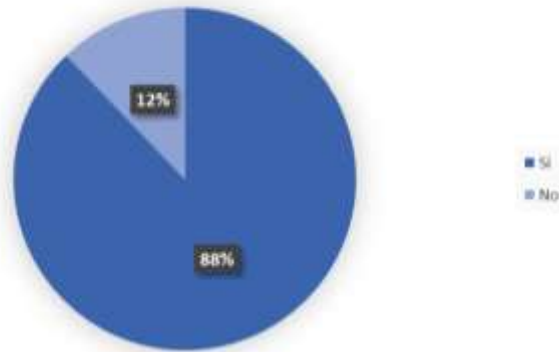


Ilustración 34 - Respuesta a la pregunta #2 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 34, se muestran los resultados con respecto a la segunda pregunta, donde el porcentaje mayor indica que el 88% sí está conforme con la actual señalización del túnel, sin embargo, el 12% se encuentra inconforme; muchas de las respuestas hacen énfasis a la poca visibilidad que tienen tanto de día como de noche y también porque no hay señalización que indique la entrada y salida principal del túnel.

La pregunta número tres indica: "¿Cuántos carriles cree usted que son necesarios en un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 35.

Cantidad de carriles necesarios

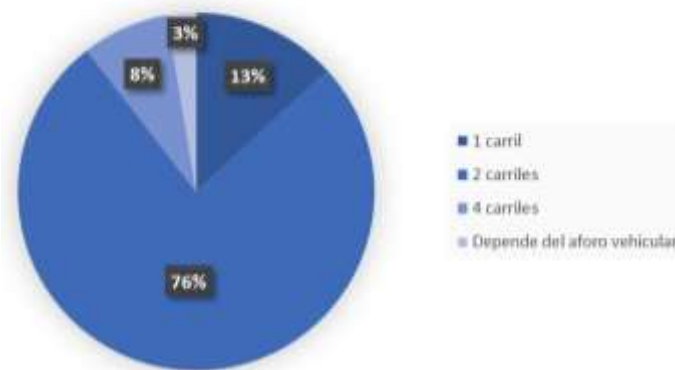


Ilustración 35 - Respuesta a la pregunta #3 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 35, se muestran los resultados con respecto a la tercera pregunta, donde se recopila directamente la opinión de los usuarios sobre con cuantos carriles se sentiría cómodo el conductor. El 76% de los usuarios establecen que con dos carriles es más que suficiente y el 13% de los usuarios se sienten satisfechos con solo un carril. Por lo tanto, esto podría suponer que para efectos de la creación de un próximo túnel carretero o uno que funja como la base para el diseño de otros, que es el caso de la tesis actual, podría considerarse el uso de dos carriles.

La pregunta número cuatro indica: "¿Cuál considera usted es el ancho mínimo de un carril para un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 36.



Ilustración 36 - Respuesta a la pregunta #4 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 36, se muestran los resultados con respecto a la cuarta pregunta, donde guarda relación con la respuesta de la pregunta tres, esta vez no haciendo hincapié en la cantidad de carriles, sino en su ancho. El 29% indicó que un ancho de 5 metros sería óptimo, el 26% eligió el ancho de 3.50 metros, y hubo un empate entre los anchos de 4.75 metros y 5.50 metros denotando al 21% de los usuarios. En función de las normativas internacionales, como la AASHTO o la MTC, se ha notado que hay un soporte por parte de los encuestados en función de la normativa por lo que cualquier valor arriba de 3.50 metros será útil para diseñar.

La pregunta número cinco indica: "Como forma de prever accidentes, ¿Considera que el túnel de la 27 y 28 calle debió incluir un carril de emergencia?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 37.

¿Sería bueno un carril de emergencia?

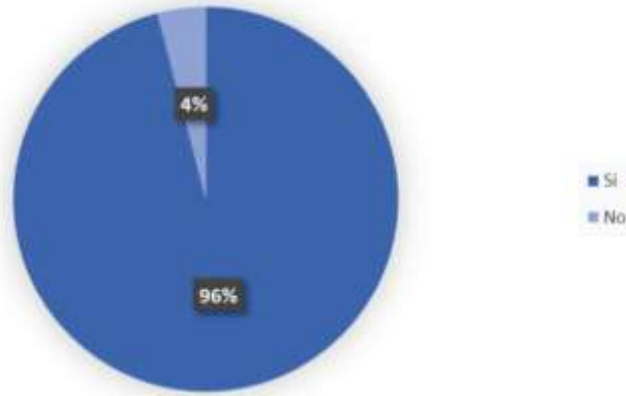


Ilustración 37 - Respuesta a la pregunta #5 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 37, se muestran los resultados con respecto a la quinta pregunta, se indica que el 96%, en representación de los usuarios, considera que el túnel de 27 y 28 calle debió incluir un carril de emergencia o bahía, dando a entender que la seguridad esta antes que todo y que este tipo de complementos deben de incluirse de manera casi obligatoria. Para efectos de un diseño posterior, el tema de la iluminación debe de contemplarse en todo momento en los detalles.

La pregunta número seis indica: "¿Cuál considera debería de ser el ancho mínimo de un carril de emergencia para un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 38.

Ancho de un carril de emergencia

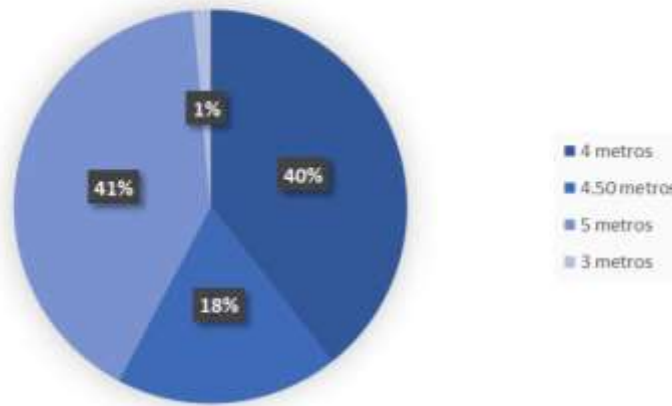


Ilustración 38 - Respuesta a la pregunta #6 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 38, se muestran los resultados con respecto a la sexta pregunta, donde guarda relación con la quinta pregunta, esta vez se pregunta el ancho del carril de emergencia deseado, que también puede entender como una bahía o una isla en la cual se puedan hacer paradas de emergencia. El 41% indicó que un ancho de 5 metros les parecería bien, al 40% le pareció que un ancho de 4 metros también funcionaba. Cabe destacar que las normas internacionales establecen que el ancho mínimo de una bahía oscila entre 4 y 5 metros respectivamente.

La pregunta número siete indica: "En el caso de que se construyan más obras semejantes a esta en el futuro, ¿Considera necesario la instalación de un teléfono de emergencia?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 39.

¿Es necesario un telefono de emergencia?

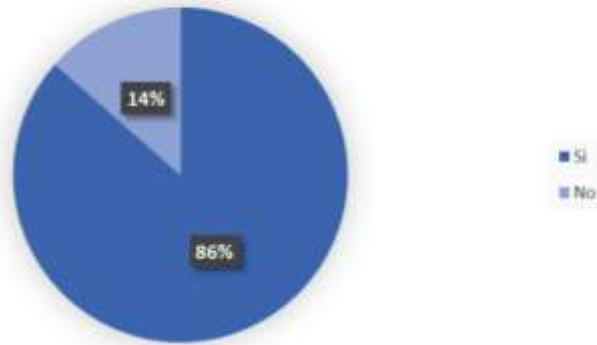


Ilustración 39 - Respuesta a la pregunta #7 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 39, se muestran los resultados con respecto a la séptima pregunta, aquí se evalúa nuevamente la opinión del usuario, como medida de seguridad se toma en cuenta la instalación de un teléfono en el carril de emergencia o bahía de un túnel. El 86% de los usuarios indican que sería de gran provecho un teléfono para emergencias, el 14% establece lo contrario haciendo énfasis en que nadie lo usaría o que se lo robarían.

La pregunta número ocho indica: "¿Considera adecuada la iluminación nocturna utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 40.

¿Esta de acuerdo con la iluminación nocturna?

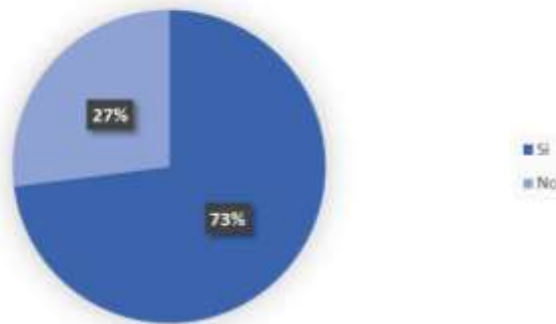


Ilustración 40 - Respuesta a la pregunta #8 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 40, se muestran los resultados con respecto a la octava pregunta, esta hacia énfasis en la opinión personal de los usuarios ante la iluminación nocturna del túnel, el 73% la consideró adecuada mientras que al 27% le pareció inadecuada de diversas maneras, entre ellas está el pretexto de que los colores de las luminarias son molestos y distorsionan la vista, también que *"la zona parece disco."*

La pregunta número nueve indica: "¿Considera adecuada la iluminación diurna utilizada en el túnel de la 27 y 28 calle?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 41.



Ilustración 41 - Respuesta a la pregunta #9 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 41, se muestran los resultados con respecto a la novena pregunta, esta hacia énfasis en la opinión personal de los usuarios ante la iluminación diurna del túnel, el 68% la consideró adecuada mientras que al 32% le pareció inadecuada de diversas maneras, entre ellas está la opinión de que la luz es muy tenue, que incomoda la vista, usa colores innecesarios, entre otros. Cabe recalcar que en comparación con la pregunta acerca de la iluminación nocturna, en la diurna aún hay gente que considera de que no hay suficiente iluminación en el día por lo que se deben buscar otras opciones.

La pregunta número 10 indica: "¿Considera cómodo y seguro el ancho de carril del túnel de la 27 y 28 calle?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 42.

¿Se siente cómodo con el actual ancho de carril del túnel de la 27 y 28 calle?

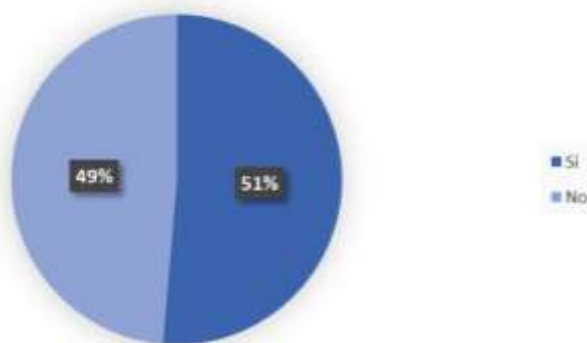


Ilustración 42 - Respuesta a la pregunta #10 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 42, se muestran los resultados con respecto a la décima pregunta, en ella el usuario vuelve a dar su opinión acerca del ancho del túnel, esta vez tomando como referencia el ancho del túnel de 27 y 28 calle, el 51% considero que el actual ancho de carril que posee el túnel es el adecuado mientras que el 49% especifico lo contrario dando a entender que los usuarios estarían más cómodos teniendo más espacio ya sea para que transiten más vehículos o para poder maniobrar con más libertad.

La pregunta número 11 indica: "¿Le parece adecuada la altura del túnel de la 27 y 28 calle?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 43.

¿Esta de acuerdo con la altura actual del túnel de la 27 y 28 calle?

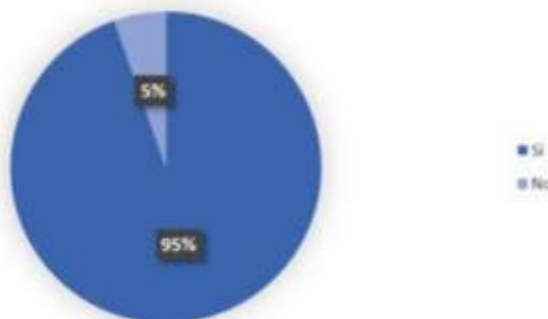


Ilustración 43 - Respuesta a la pregunta #11 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 43, se muestran los resultados con respecto a la undécima pregunta, en ella el usuario da su opinión acerca de la altura (galibo) actual que posee el túnel de la 27 y 28 calle, el 95% de los encuestados admite que la altura del túnel es la más adecuada, lo suficiente como para que pase todo tipo de vehículo pesado como lo pueden ser autobuses, furgonetas o camiones. El túnel de la 27 y 28 calle posee una altura de aproximadamente 6 metros, las normativas recomiendan valores arriba de 5 o 5.50 metros para los gálibos por lo que para diseños posteriores se debe de tomar en cuenta alturas mayores o semejantes a la anteriormente estipulada.

La pregunta número 12 indica: "¿Cree usted que la constante implementación de este tipo de obras (túneles carreteros) ayudaría a solucionar muchos de los problemas viales que actualmente se experimentan en la ciudad, como lo puede ser el tráfico vehicular excesivo?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 44.

¿Es necesaria la implementación de mas túneles carreteros?

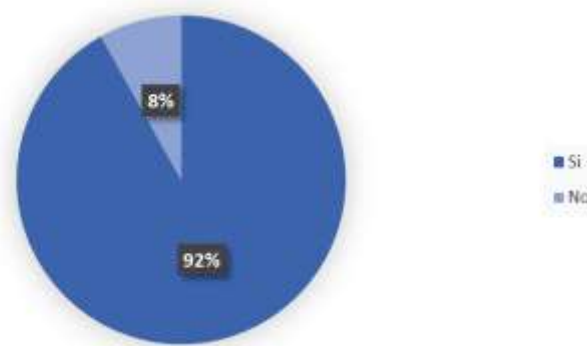


Ilustración 44 - Respuesta a la pregunta #12 H.S.P.S.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 44, se muestran los resultados con respecto a la duodécima pregunta, en la que varios de los encuestados, específicamente un 92%, expresaron que la frecuente implementación de túneles carreteros en la ciudad de San Pedro Sula funcionaría como una solución vial a muchos de los problemas de tránsito que actualmente experimentan muchos conductores; la respuesta positiva a esta pregunta muestra que la mayoría de los usuarios conocen las ventajas y los beneficios inmediatos que traen consigo este tipo de obras.

La pregunta número 13 indica: "Tomando como referencia el túnel de la 27 y 28 calle, ¿Dónde considera usted se deberían implementar más túneles semejantes a este en la ciudad de San Pedro Sula?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Salida hacia Puerto Cortés
- Bulevar del Norte
- Bulevar del Sur
- 2do Anillo Periférico
- Bulevar del Norte, frente al IHSS
- Avenida Circunvalación, para liberar semáforos
- Salida a La Lima
- Salida a Occidente
- Cerca de la FESITRANH
- Cerca del City Mall, por el Monumento a La Madre
- Zona de Salamanca
- Cerca de Chamelecón

Se concluye que las respuestas más significativas fueron las zonas que poseen un historial de congestión vial muy alto, además de poseer espacios amplios en los cuales se pueden ya sea, ampliar la vía existente o construir un túnel junto con otras obras complementarias. Sin embargo, pese a que estas zonas tienen problemas, muchas de las antes mencionadas no cumplen con los requisitos geotécnicos para poder implementar un túnel carretero, como lo puede ser la adecuada topografía, por ejemplo; la excepción más significativa en el listado es el sector cerca de Chamelecón donde la Municipalidad tenía planeado construir otro túnel, pero hasta la fecha no ha habido indicios de algún futuro proyecto.

5.1.2 CUESTIONARIO DIRIGIDO A LOS HABITANTES

La pregunta número uno indica: "¿Ha transitado La pregunta número uno indica: "¿Cómo ingeniero civil, cual es la especialidad/campo de trabajo a la que pertenece?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 45.



Ilustración 45 - Respuesta a la pregunta #1 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 45, se muestran los resultados con respecto a la primera pregunta, donde se trató de segmentar un poco a los ingenieros que fueron encuestados, se tenían al alcance cinco opciones y una casilla para especificar una especialidad o campo de trabajo que no formaba parte de las principales opciones, fue sorprendente el ver que los seis encuestados tenían distintas especialidades, como se mira en el gráfico, siendo el más significativo el ingeniero que posee un master en túneles y obras subterráneas.

La pregunta número dos indica: "Actualmente la exploración geofísica ofrece una variedad amplia de métodos y modalidades, ¿Cuáles de los siguientes métodos considera útiles e imprescindibles en la construcción de un túnel carretero? (Puede elegir más de uno)", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 46.

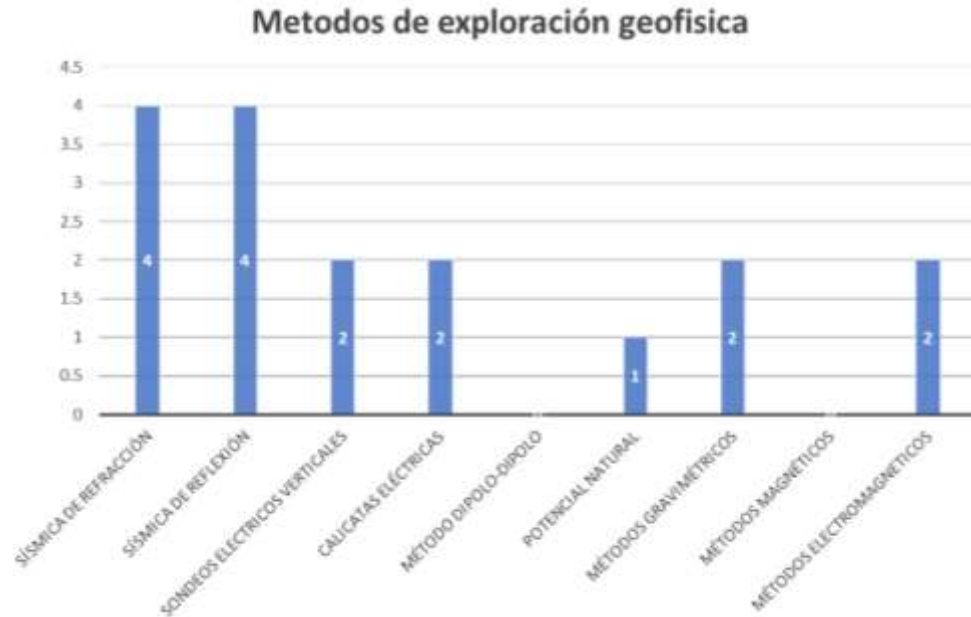


Ilustración 46 - Respuesta a la pregunta #2 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 46, se muestran los resultados con respecto a la segunda pregunta, donde se pidió la opinión profesional de los ingenieros sobre cuáles de los siguientes métodos o ensayos consideran que son los más necesarios a aplicar previo al diseño de un túnel carretero, siendo los métodos que más destacan: La Sísmica de Refracción y la Sísmica de Reflexión. Los datos obtenidos para una puntuación de tres fueron del 66.7% que representa a cuatro de los seis encuestados, en ambas opciones.

La pregunta número tres indica: “Existe una vasta cantidad de ensayos in situ para la recopilación de información física real del material en el subsuelo, ¿Cuáles de los siguientes ensayos in situ permiten determinar las características geotécnicas más importantes del terreno? (Puede elegir más de uno)”, por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 47.

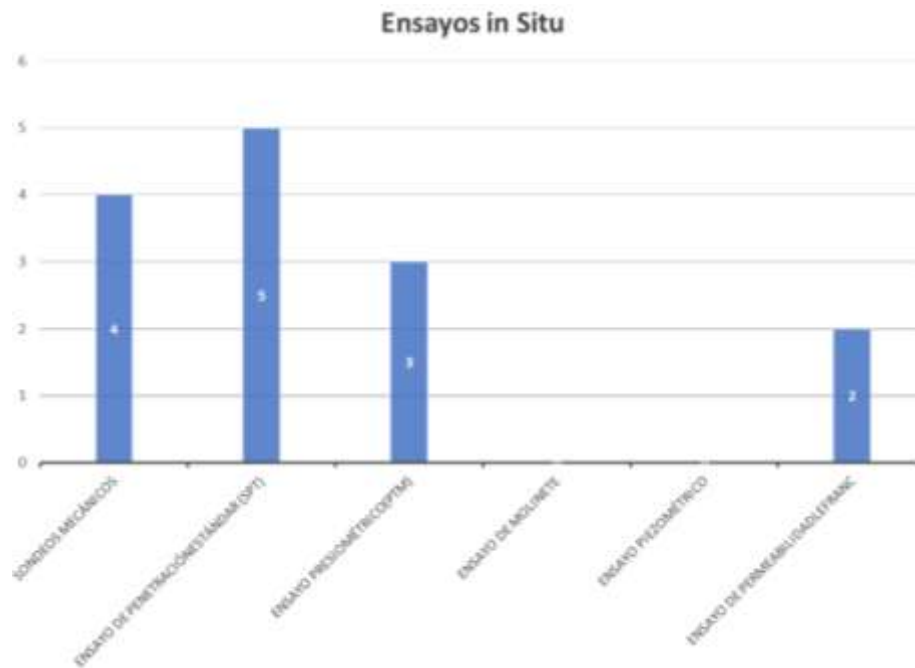


Ilustración 47 - Respuesta a la pregunta #3 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 47, se muestran los resultados con respecto a la tercera pregunta, donde se pidió la opinión profesional de los ingenieros sobre cuáles de los siguientes ensayos in situ consideran que son imprescindibles para determinar las características del subsuelo previo a la implementación de un túnel. Los datos obtenidos muestran que el ensayo más solicitado y utilizado hasta la actualidad es el Ensayo de Penetración Estándar o SPT, con cinco de los seis encuestados considerando este ensayo el más adecuado con un dato del 83.3%, siguiéndole después de este los Sondeos Mecánicos con un dato del 66.7% que representa a cuatro encuestados.

La pregunta número cuatro indica: "¿Cuáles de los siguientes ensayos en laboratorio son necesarios para la identificación de las propiedades del suelo y su resistencia a cargas? (Puede elegir más de uno)", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 48.



Ilustración 48 - Respuesta a la pregunta #4 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 48, se muestran los resultados con respecto a la cuarta pregunta, donde se pidió la opinión profesional de los ingenieros sobre cuáles de los siguientes ensayos de laboratorio consideran que son imprescindibles para determinar las características del subsuelo previo a la implementación de un túnel. Los datos obtenidos muestran que hay variedad, ya que muchos ingenieros consideran que los ensayos de laboratorio son de suma importancia, los seis encuestados determinaron que el Ensayo Triaxial es el más imprescindible, este corresponde al 100% de los encuestados, seguido del Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial con un total de cinco encuestados que corresponde a un 88.3%, por último el ensayo de Peso Específico y Humedad y Absorción con un total de cuatro encuestados correspondiente a un 66.7% en ambos.

La pregunta número cinco indica: "¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen el diseño geométrico y el diseño estructural de túneles carreteros?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Manual de carreteras (SOPTRAVI)
- Manual de la SIECA
- AASHTO
- AASHTO T-20
- Se puede tomar la de España

Se concluye que de estas cinco respuestas nada más se tomarán en cuenta dos, esas son las normativas de INSEP, que antes era SOPTRAVI, por medio del Manual de Carreteras de Honduras y el Manual de la SIECA que a pesar de no ser un manual hondureño el mismo está dirigido a toda Centroamérica por lo que es técnicamente aplicable. Las demás normativas mencionadas son extranjeras.

La pregunta número seis indica: "¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen los procedimientos a realizar, los materiales a emplear y la maquinaria a utilizar en la construcción de túneles carreteros?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Manual de carreteras (SOPTRAVI)
- Manual de la SIECA
- AASHTO
- Para la maquinaria dependerán de las dimensiones de las obras y sus estudios geotécnicos

Se concluye que de estas cuatro respuestas se tomará en cuenta solo una que es la AASHTO, debido a que ni siquiera los manuales dirigidos a toda Centroamérica hacen referencia a los procesos constructivos, y los materiales y maquinaria a emplear para la construcción de un túnel carretero. En otras palabras, no existe una guía, manual o normativa nacional que responda a estas interrogantes por lo que se opta por utilizar normativas extranjeras.

La pregunta número siete indica: "¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales nacionales rigen la iluminación, la señalización, el sistema hidráulico y el sistema eléctrico de túneles carreteros?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Manual de carreteras (SOPTRAVI)
- Manual de la SIECA
- AASHTO
- Para la maquinaria dependerán de las dimensiones de las obras y sus estudios geotécnicos

Se concluye que de estas cuatro respuestas se tomará en cuenta solo una que es la del Manual de la SIECA, este manual hace referencia a los temas de señalización e iluminación vial utilizados en toda Centroamérica, y al incluir a Honduras, entonces dicho manual puede contarse como normativa nacional.

La pregunta número ocho indica: "¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales internacionales rigen el diseño geométrico y el diseño estructural de túneles carreteros?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Manual de carreteras (SOPTRAVI)
- Manual de la SIECA
- AASHTO
- AASHTO T20
- Las europeas

Se concluye que de estas cinco respuestas nada más se tomarán en cuenta dos, una es la AASHTO, en todas sus versiones, y en cierta parte las normativas europeas que son independientes a las de la AASHTO, pero nada más serian utilizadas como referencia. Las demás normativas antes mencionadas son nacionales o no tienen relevancia.

La pregunta número nueve indica: "¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales internacionales rigen los procedimientos a realizar, los materiales a emplear y la maquinaria a utilizar en la construcción de túneles carreteros?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Manual de carreteras (SOPTRAVI)
- Manual de la SIECA
- AASHTO
- Las europeas

Se concluye que de estas cuatro respuestas se tomará en cuenta solo una que es la AASHTO, a pesar de que estas normativas están en ingles aun así contienen la información necesaria para responder a la anterior interrogante, como referencia también se planea utilizar el manual de túneles y obras subterráneas de la MTC.

La pregunta número 10 indica: "¿Qué normativas, guías técnicas y/o manuales internacionales rigen la iluminación, la señalización, el sistema hidráulico y el sistema eléctrico de túneles carreteros?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Manual de carreteras (SOPTRAVI)
- Manual de la SIECA
- AASHTO
- Las europeas

Se concluye que de estas cuatro respuestas se tomará en cuenta solo una que es la AASHTO, en términos de señalización e iluminación se estableció anteriormente que el Manual de la SIECA, a pesar de solo aplicar para Centroamérica, era el más indicado. Las demás normativas antes mencionadas son nacionales o se desconocen de su contenido en Honduras.

La pregunta número 11 indica: "En base a su experiencia y considerando la disponibilidad, las metodologías, transporte y mantenimiento de estos materiales, ¿Qué material considera es el adecuado a utilizar en un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 49.

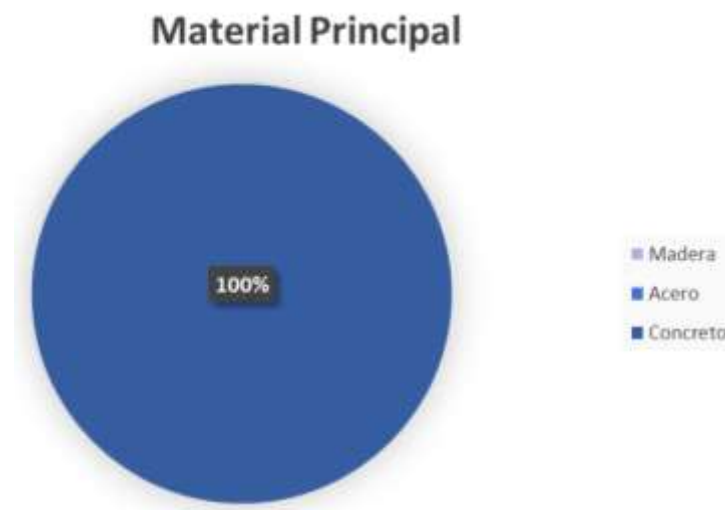


Ilustración 49 - Respuesta a la pregunta #11 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 49, se muestran los resultados con respecto a la undécima pregunta, donde se pidió la opinión profesional de los ingenieros sobre cuál de los siguientes materiales era de mayor provecho al momento de construir un túnel, aun sin saber la respuesta se sabía que al final el material conocido como concreto era el que iba a perdurar, el 100% de los ingenieros encuestados eligió este material.

La pregunta número 12 indica: "Según el material seleccionado anteriormente, ¿Qué técnicas constructivas se recomiendan aplicar en la construcción de un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Equipo especializado para túnel
- Prefabricados
- Con Maquina de tuneladora (TBM). Métodos de excavación sin zanjas
- Dependerá de las condiciones geotécnicas de las rocas o suelos

Se concluye que se tomarán en cuenta las cuatro respuestas, es en estos momentos que se descarta el Código Hondureño de la Construcción (CHOC) debido a que dicha guía no incluye información referente al diseño de túneles, en cuanto a la maquinaria antes mencionada, cabe recalcar que existen diferentes forma de llevar a cabo la construcción de un túnel carretero, desde su excavación hasta su montaje y la maquinaria pesada es imprescindible, con respecto al prefabricado y las tuneladoras se debe de aclarar que a pesar de que con ellas se ahorra tiempo el costo aumenta inconmensurablemente.

La pregunta número 13 indica: "En función de las técnicas constructivas que mencionó anteriormente, ¿Qué equipo y maquinaria considera sean requeridos para el desarrollo de un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Perforadora de túnel
- Excavadoras, TBM, equipo para prefabricado de concreto
- Dependerá de los estudios geotécnicos
- Tuneladoras TBM

Se concluye que se tomarán en cuenta las cuatro respuestas, es en estos momentos que se descarta el Código Hondureño de la Construcción (CHOC) debido a que dicha guía no incluye información referente al diseño de túneles, en cuanto a la maquinaria antes mencionada, cabe recalcar que cada una de ellas aplica, pero es necesario tener en cuenta que la maquinaria dependerá de la geotecnia del terreno en su mayoría y también del presupuesto inicial que tenga la obra ya que muchas de estas máquinas y equipos, por mucha ventaja que traigan, son extremadamente caras.

La pregunta número 14 indica: "¿Cada cuánto considera usted se le debería dar mantenimiento a este tipo de obra civil?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 50.



Ilustración 50 - Respuesta a la pregunta #14 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 50, se muestran los resultados con respecto a la decimocuarta pregunta, donde se hace énfasis acerca del mantenimiento de la estructura, en esta pregunta se les pide a los ingenieros que se den su opinión acerca del tiempo de mantenimiento requerido para una obra civil de este calibre. Tres de los seis encuestados definieron un tiempo de mantenimiento de 6 meses correspondiente al 50% de la muestra, dos encuestados definieron un tiempo de exactamente 1 año específicamente el 33%. Esto nos da a entender que el tema del mantenimiento varía de obra en obra y que no siempre debe de ser inmediato pero que tampoco debe de ignorarse y prolongarse a más de 1 año.

La pregunta número 15 indica: "En base a sus conocimientos, ¿Cuál considera es la sección típica más adecuada para un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 51.

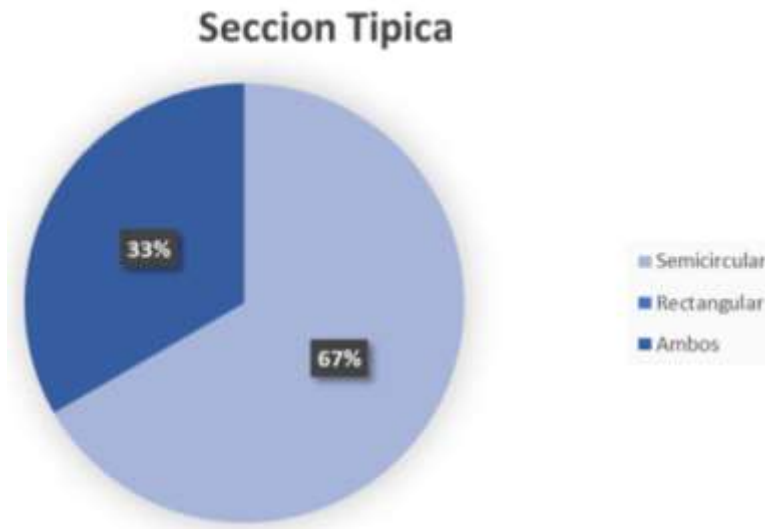


Ilustración 51 - Respuesta a la pregunta #15 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 51, se muestran los resultados con respecto a la decimoquinta pregunta, donde se pide la opinión profesional de cuál de las dos secciones típicas (semicircular y rectangular) es la más adecuada o la que mejor se adapta a la estética de San Pedro Sula, de los seis encuestados cuatro eligieron la opción de la sección semicircular que es la sección típica más utilizada en países extranjeros y de la que más se hace énfasis en los manuales de diseño, el dato correspondiente fue de un 67%, mientras que el resto de los encuestados, específicamente el 33%, expreso que ambas secciones son de alto provecho.

La pregunta número 16 indica: "¿Cuántos carriles considera usted que son necesarios en un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 52.

Cantidad de carriles necesarios

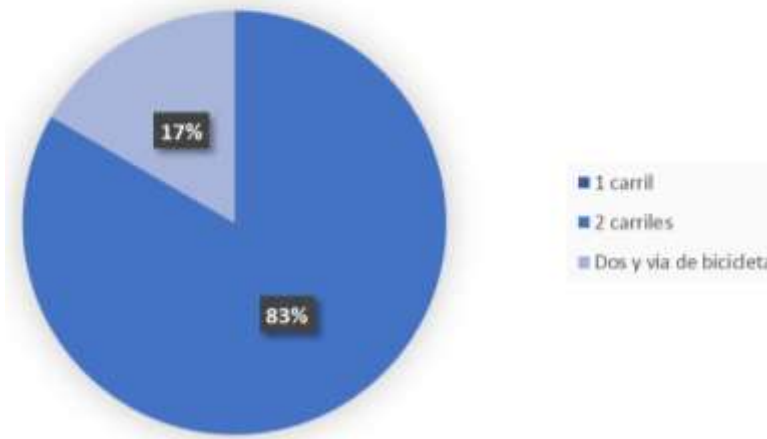


Ilustración 52 - Respuesta a la pregunta #16 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 52, se muestran los resultados con respecto a la decimosexta pregunta, se le consulto a los profesionales la cantidad de carriles necesarios para un túnel carretero y por obvias razones muchos de los encuestados, especialmente cinco, correspondiente al 83% del total, eligieron la opción de dos carriles y el último encuestado recomendó que se incluyeran vías para bicicleta. Cabe recalcar que esta respuesta de los ingenieros concuerda con la pregunta que se les hizo a los usuarios con respecto a la cantidad de carriles que consideran necesarios en la cual se concluyó que dos carriles era el valor más óptimo.

La pregunta número 17 indica: "¿Cuál considera usted es el ancho mínimo de un carril para un túnel carretero?", se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 53.

Ancho minimo de un carril

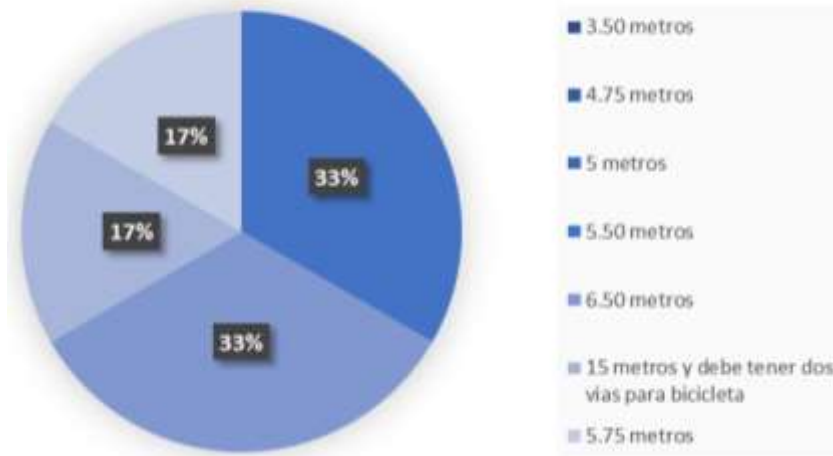


Ilustración 53 - Respuesta a la pregunta #17 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 53, se muestran los resultados con respecto a la decimoséptima pregunta, relacionándola con la pregunta dieciséis, ahora se está preguntando el ancho mínimo de carril que los profesionales consideran adecuado, fue sorprendente ver que los profesionales eligieran anchos de carril muy amplios, el 33% de los encuestados eligieron en ambos casos que un ancho de 5.50 y 6.50 metros son los más adecuados pero se sobreentiende el ancho más común, y entre algunos ingenieros considerado como el óptimo, es de 3.65 metros.

La pregunta número 18 indica: "¿Cuál considera usted es el ancho mínimo de la vereda (acera) para un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 54.

Ancho mínimo de la acera

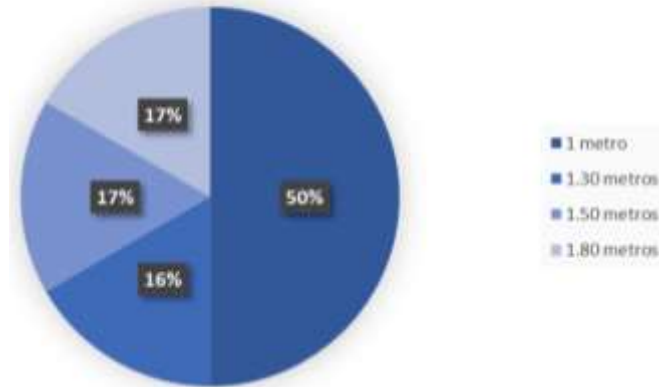


Ilustración 54 - Respuesta a la pregunta #18 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 54, se muestran los resultados con respecto a la decimoctava pregunta, se le consulto a los profesionales el ancho mínimo de la acera a incluir en la sección transversal del túnel carretero, el valor que más predominó con un dato del 50%, referente a tres de los seis encuestados, fue el ancho de 1 metro, que por experiencia se puede decir que es más que suficiente para que transite una persona a la vez.

La pregunta número 19 indica: "¿Cuál considera usted es la altura mínima de galibo para un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 55.

Altura mínima del túnel

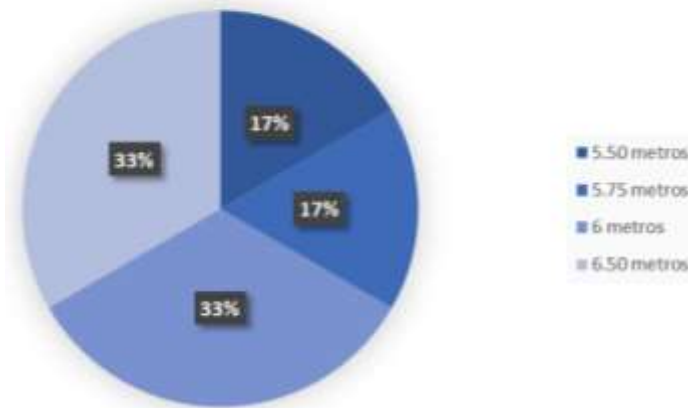


Ilustración 55 - Respuesta a la pregunta #19 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 55, se muestran los resultados con respecto a la decimonovena pregunta, en ella se consulta cual debería ser la altura mínima del túnel, denominada con el nombre técnico "galibo", aquí un tercio de los ingenieros eligieron el valor de 6 metros (33%) y otro tercio eligió el valor de 6.50 metros (33%). Cabe recalcar que, en muchos de los manuales referentes al diseño de túneles, el galibo mínimo a utilizar en túneles de sección semicircular es de 5.50 metros, según la norma.

La pregunta número 20 indica: "En su opinión, ¿Cuál es el vehículo más pesado y/o grande que debe de tomarse en cuenta para diseñar la sección geométrica de un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Ilustración 56.

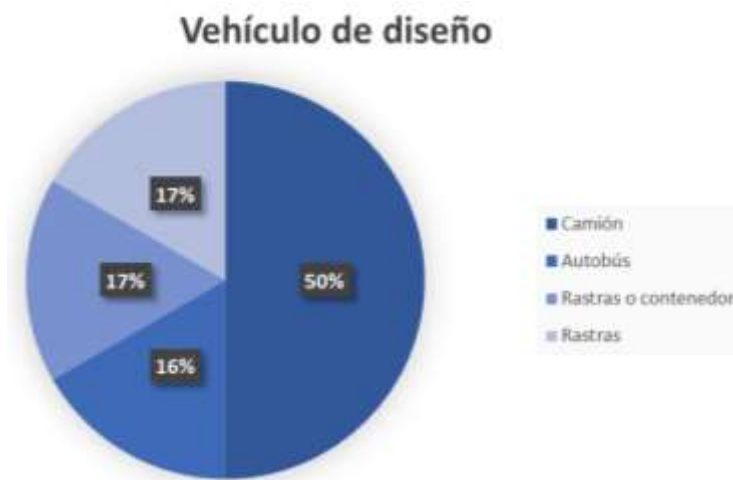


Ilustración 56 - Respuesta a la pregunta #20 I.C.E.

Fuente: (Propia, 2021)

En base a la Ilustración 56, se muestran los resultados con respecto a la vigésima pregunta, aquí se les consulta a los ingenieros cuál de los siguientes vehículos es el más adecuado a considerar como vehículo de diseño, en el caso de los puentes se consideran camiones, mientras que los túneles no tienen un vehículo de diseño. En base a los datos obtenidos, el 50% de los encuestados, que corresponde a tres de los seis ingenieros, eligieron el camión como vehículo de diseño para túneles carreteros, las otras opciones como lo son el autobús también era un vehículo recomendado.

La pregunta número 21 indica: "¿Qué detalles geométricos son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- La escala depende del tamaño de papel
- Secciones, espesores, detalles, planta-perfil. etc. y a escalas adecuadas según tamaño de planos.
- Detalles de iluminación, ventilación, eléctricos
- Secciones, excavaciones, plano rectilíneo
- 1:50

Se concluye que de estas cinco respuestas se tomarán en consideración todas, ya que muchas de estas respuestas hacen énfasis en los detalles más importantes a mostrar en los planos y dan libertad en cuanto a la escala.

La pregunta número 22 indica: "¿Qué detalles estructurales son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Geometría, refuerzo y detalles de conexión
- Armados, refuerzos, apoyos, etc. A escala según tamaño de planos.
- Refuerzo temporales y permanentes
- Estructurales
- 1:25

Se concluye que de estas cinco respuestas se tomarán en consideración solo cuatro, en las secciones a presentar en los planos son pocos los detalles estructurales que se lograran apreciar, pero sí de alguna forma llegan a contener armados o refuerzos entonces es de suma importancia detallarlos, nuevamente se da libertad en cuanto a la escala a utilizar.

La pregunta número 23 indica: "¿Cuántos metros debe abarcar una planta del túnel y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Depende del tamaño de papel, debe ser claro
- Mínimo 100 metros de túnel a escala 1/100
- Unos 500 metros
- Depende de la longitud del túnel
- 1:100

Se concluye que de estas cinco respuestas se tomarán en consideración todas, se tiene planeado mostrar una vista en planta del túnel mostrando la sección del pavimento y otra mostrando su trayectoria en el alineamiento horizontal, la longitud dependerá del alineamiento y la escala dependerá del tamaño de la hoja.

La pregunta número 24 indica: "¿Cuántos metros debe abarcar un corte longitudinal y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Depende del tamaño de papel, debe ser claro
- Escala V:1/10 y H:1/100
- 500 metros
- Depende del diseño
- 800 metros

Se concluye que de estas cinco respuestas se tomarán en consideración todas, se tiene planeado mostrar una vista longitudinal del túnel con todos sus componentes en el mismo plano con su vista en planta, además de que se mostrará una vista longitudinal del alineamiento vertical del túnel que dependerá en su mayoría de la topografía del terreno.

La pregunta número 25 indica: "¿A cada cuanto se debe realizar un corte transversal y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Depende del tamaño de papel, debe ser claro
- Cada cambio de dirección, cambio de sección etc.
- 50 metros
- Cada 20 metros deben ser según diseño

Se concluye que de estas cuatro respuestas se tomarán en consideración solo dos, normalmente las secciones se hacen a cada 20 metros, pero al momento de relacionar los alineamientos con los cortes transversales se debe de tener cuidado en incluir solo las secciones necesarios por lo que la distancia de sección por plano oscila entre los 50 metros y 100 metros.

La pregunta número 26 indica: "¿Qué otro tipo de planos considera son necesarios en un manual para el diseño preliminar de un túnel carretero?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Los necesarios para mostrar cada detalle del trabajo.
- Detalles de espacios y uso de los mismos en el túnel. Además de ventilación y estudios de flujo y renovación de aire.
- Eléctrico, ventilación y el soporte temporal.
- Señalización, plano de salidas de emergencia en túneles de longitudes largas.

Se concluye que de estas cuatro respuestas se tomarán en consideración todas, ya que muchos de los planos previamente expuestos son los mismos que se tenían planeados incluir en el entregable final siendo tal vez el único detalle no considerado el de la ventilación, este normalmente se incluye en túneles de longitudes mayores, por ejemplo, 500 metros.

La pregunta número 27 indica: "¿Qué es lo más importante a detallar del sistema eléctrico en un túnel carretero y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Panel de control.
- Distribución en el plano según diseño y un sistema de soporte en caso de no tener energía por fallas del sistema.
- Acometidas, y circuitos, que sean claros los planos.
- Iluminación, estaciones de emergencia, ventilación etc.
- Iluminación y ventilación.

Se concluye que de estas cinco respuestas se tomarán en consideración todas, en específico los detalles del panel de control y las luminarias, los ingenieros también recomiendan detallar cualquier circuito que pueda ser visible por el conductor, pero nada más se intentara incluir lo necesario y lo imprescindible en los planos finales.

La pregunta número 28 indica: "¿Qué es lo más importante a detallar del sistema hidráulico en un túnel carretero y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Toma de Agua
- Los drenajes y pozos de inspección, invertidas
- Drenajes y sistemas de combate contra incendio. La escala dependerá del tamaño de los planos. 1:100 puede ser adecuada.
- Drenajes pluviales y aguas peligrosas

Se concluye que de estas cuatro respuestas se tomarán en consideración todas, se entiende que una de las deficiencias más grandes que tiene Honduras en sus carreteras es la incapacidad de drenar toda el agua proveniente de las precipitaciones o de cualquier agente externo, los ingenieros recomiendan detallar los drenajes pluviales (de tenerlos) y pozos de inspección, la escala se deja a libertad del diseñador.

La pregunta número 29 indica: "¿Qué detalles de señalización horizontal son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Plano planta perfil indicando la ubicación UTM de cada señal, y plano con las especificaciones de diseño de la señalización.
- Lo recomendado por la norma, planos legibles.
- Escala 1/100. Indicar dirección, salidas, puntos de emergencia etc.
- Reducción de velocidades

Se concluye que de estas cuatro respuestas se tomarán en consideración todas, en especial las que hacen énfasis en la señalización que indica la entrada, la salida y cualquier otro punto de referencia del túnel. Cabe señalar que cualquier otra señalización que brinde la norma dependerá de la ubicación geográfica del túnel, en el caso de escala, nuevamente se da libertad en el diseño.

La pregunta número 30 indica: "¿Qué detalles de señalización vertical son imprescindibles y en que escala se deberán presentar en los planos?", por consiguiente, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

- Lo recomendado por la norma, planos legibles
- Espacios, alturas mínimas, salidas, etc. La escala debe ser legible. 1/100 es recomendada.
- Altura máxima, longitud del túnel

Se concluye que de estas tres respuestas se tomarán en consideración todas, según los ingenieros se debe de considerar la altura del túnel para la señalización vertical pero como se ha definido siempre en clases de la carrera pasadas, la señalización vertical debe de estar posicionada a una cierta distancia del elemento para que el conductor la pueda apreciar con anticipación.

5.2. RESUMEN DE VARIABLES

En referencia a las cinco variables independientes del documento, se recopiló la información presentada con anterioridad a través de dos encuestas, una dirigida hacia los habitantes de la ciudad de San Pedro Sula y otra a ingenieros civiles expertos.

Con respecto a la primera variable, gracias a las respuestas anteriormente tabuladas de la encuesta de los ingenieros, se especificaron los ensayos, tanto in situ como de laboratorio, necesarios para poder determinar que zonas en San Pedro Sula cumplen con los requisitos geotécnicos necesarios para poder llevar a cabo la construcción de un túnel carretero. Entre estos ensayos están el de Penetración Estándar (SPT), los Sondeos Mecánicos, la Sísmica de Refracción y Reflexión, el Ensayo Triaxial, entre otros.

Además de también señalar que el sector o zona de San Pedro Sula que más oportunidad tiene de que se implementen obras de este calibre en el futuro es el sector sur, esto debido a su topografía de la cual se hizo mucho énfasis en entrevistas y asesorías pasadas, en comparación con la topografía del sector norte la cual es denominada inestable.

La segunda variable habla sobre las normativas tanto nacionales como internacionales a emplear para el diseño de túneles carreteros. Los ingenieros recomendaron las siguientes normativas nacionales: Manual de Carreteras (SOPTRAVI) y Manual de la SIECA. En cuanto a las normativas internacionales los ingenieros recomendaron utilizar: AASHTO LRFD, AASHTO T-20 y las normativas europeas, siendo más específicos la que actualmente se utiliza en España, la IOS-98. Por medio de asesorías se recomendó utilizar la normativa peruana de la MTC.

Por otra parte, se tiene la tercera variable, a través de la cual se obtienen recomendaciones técnicas y requerimientos de los ingenieros civiles. Estos profesionales mencionan que el material principal a emplear tiene que ser el concreto hidráulico, y que la sección típica del túnel debería ser semicircular, aunque varios opinaron que una sección rectangular trabajaría igual de bien.

Además, tanto los ingenieros como los habitantes indican que el túnel debe de ser de dos carriles, también que el ancho mínimo del carril debe de estar entre 3.50 y 5 metros. Es importante que el túnel contenga aceras para permitir el paso de los peatones y que su ancho sea de mínimo 1 metro, también que la altura mínima del túnel sea de por lo menos unos 6 metros para permitir el paso de vehículos pesados.

En cuanto a la cuarta variable, se dieron a conocer las necesidades o exigencias de los usuarios en torno al túnel de la 27 y 28 calle que es el más claro ejemplo que existe actualmente en la ciudad de San Pedro Sula. El 88% de los encuestados indican que han transitado al menos una vez por dicho túnel y el 92% establecen que es necesaria la implementación de más túneles carreteros en la ciudad, como medida para ampliar las vías existentes y alivianar el tránsito vehicular que actualmente en ciertas zonas. Además, se indica que sería de mucho provecho la implementación de un carril de emergencia o bahía dentro de la estructura.

Por último, en cuanto a la quinta variable, el contenido de relevancia y necesidad del manual, gracias a las respuestas recopiladas de las encuestas, asesorías y entrevistas, se estableció que sería el siguiente:

- Generalidades
- Estudios Geológicos – Geotécnicos
- Clasificación Geomecánica
- Sostenimiento y Revestimiento
- Diseño Geométrico
- Diseño Estructural
- Señalización
- Drenaje
- Iluminación
- Mantenimiento
- Planos

5.3. ENTREGABLE

¿Cómo leer este documento?

Para facilitar la comprensión del **Manual de Diseño Preliminar de Tuneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras** es necesario conocer la manera en la que este está estructurado.

El documento se encuentra dividido en once Capítulos cuyo contenido es distribuido en Secciones, que a su vez incluyen Subtemas referentes a la sección y capítulo correspondiente.

A continuación se muestra la estructura del documento y la forma en la que debe ser leído:

Verticalmente y en negritas se encontrará la numeración del capítulo, seguido del tema del mismo.



Las secciones relacionadas que componen el capítulo se encontrarán enlistadas seguidas de una serie de puntos

Diagrama de un capítulo con una barra horizontal azul y una lista de secciones:

SECCIÓN 1	P.#
SECCIÓN 2	P.#
SECCIÓN 3	P.#
SECCIÓN 4	P.#

Número de página en la que se encuentra la sección correspondiente

En la parte superior izquierda se ubica el número de capítulo blanco y negritas



Seguido de un rectángulo gris se encontrará el título de la sección

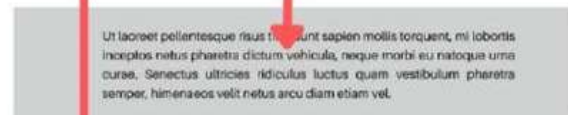
SECCIÓN

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit, sollicitudin litora est integer laoreet interdum posuere, lobortis quismod hendrerit nisi a tristique. Commodo quam libero ultricies accumsan praesent purus tincidunt habitasse ante faucibus fermentum porttitor, penatibus sem vel semper ridiculus laoreet augue nunc mi ornare hendrerit. Torquent inceptos ultricies ridiculus libero sodales viverra elementum litora, odio arcu fermentum turpis gravida facilisis pellentesque.

SUBTEMA

Ut laoreet pellentesque risus tincidunt sapien mollis torquent, mi lobortis inceptos netus pharetra dictum vehicula, neque morbi eu natoque urna curae. Senectus ultricies ridiculus luctus quam vestibulum pharetra semper, himenaeos velit netus arcu diam etiam vel.

Datos curiosos e información adicional se encontrará en rectángulos horizontales grises



Dentro de una sección se podrán encontrar subtemas, cuyos títulos están en negritas, con alineación a la izquierda

La numeración de página estará ubicada en la esquina inferior derecha



MANUAL DE DISEÑO PRELIMINAR DE TÚNELES CARRETEROS EN SAN PEDRO SULA, HONDURAS

ESPECIFICACIONES GENERALES PARA
EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

SAN PEDRO SULA
ENERO, 2022



MANUAL DE DISEÑO PRELIMINAR DE TÚNELES CARRETEROS EN SAN PEDRO SULA, HONDURAS

Especificaciones generales para
el diseño y construcción



SAN PEDRO SULA
ENERO, 2022

DEDICATORIA

“Dedicamos este manual a Dios, nuestras familias, amigos y docentes quienes nos concedieron su apoyo incondicional y brindaron sus conocimientos profesionales y de vida a lo largo de la carrera universitaria para crecer sabiamente como Ingenieros Civiles.”

Caballero D. Jarufe P. Urías J

TABLA DE CONTENIDO



01

GENERALIDADES

02

**ESTUDIOS GEOLÓGICOS -
GEOTÉCNICOS**

03

**CLASIFICACIÓN
GEOMECÁNICA**

04

**SOSTENIMIENTO Y
REVESTIMIENTO**

05

**DISEÑO
GEOMÉTRICO**

06

**DISEÑO
ESTRUCTURAL**

07

SEÑALIZACIÓN

08

DRENAJE

09

ILUMINACIÓN

10

MANTENIMIENTO

11

PLANOS

GLOSARIO

Apuntalar: colocación de una barra para evitar el desplazamiento de un punto en su sentido, el al atirantar puede estar trabajando a compresión o a tracción.

Encofrado: es la totalidad de marcos de madera insertado a ciertos intervalos para dar soporte al suelo, mientras el túnel es excavado.

Estabilización de suelos: aplicación combinada de refuerzo del suelo y soporte del suelo para prevenir el hundimiento de la capa rocosa.

Gálibo: altura libre mínima entre el punto más elevado de la calzada y el punto más bajo de la superficie superior del túnel. Si existe algún tipo de equipo situado en la parte superior del túnel, el gálibo es hasta el punto más bajo de este. Esta altura es constante y permanente para el flujo del tráfico permitido dentro del túnel.

Iluminación: conjunto de luces que hay en un espacio físico con el fin de esclarecer el ambiente, permitiendo la visibilidad.

Litología: ciencia que estudia las características de las rocas, como ser su estructura, color, composición mineral, tamaño del grano y su composición de sus partes.

Mantenimiento: Todas las acciones que tienen como objetivo mantener un artículo o restaurarlo a un estado en el cual pueda llevar a cabo alguna función requerida. Estas acciones incluyen la combinación de las acciones técnicas y administrativas correspondientes.

Peso muerto: constituye el peso propio de todos los elementos estructurales y no estructurales permanentes.

Portal: la entrada o salida de un túnel desde la superficie a nivel del terreno natural.

Refuerzo: refuerzo estructural de acero mejorando la capacidad de momento de una sección de concreto.

Señalización: señal o conjunto de señales que en un lugar proporcionan una información determinada, especialmente las señales de tráfico que regulan la circulación.

Túnel: vía subterránea abierta artificialmente para el paso de personas y/o vehículos la que comunica dos puntos.

Zona de transición en un túnel: zona intermedia entre la zona de umbral y la parte interior donde puede disminuirse gradualmente la luminancia para facilitar la adaptación visual al pasar de la luminancia exterior a la interior de valor notablemente más bajo.

Zona umbral de un túnel: parte inicial de un túnel que debe estar alumbrada con el fin de permitir, a los conductores que llegan, la percepción oportuna - y con tiempo de reacción - de los posibles obstáculos.

RESUMEN EJECUTIVO



"El manual de diseño preliminar de túneles de carretera en San Pedro Sula, Honduras, fue creado con el fin de instruir a los ingenieros civiles de la zona a la metodología utilizada actualmente para el diseño de túneles carreteros con sección típica. Este manual brinda las generalidades de un túnel carretero, los estudios geológicos y geotécnicos necesarios, las bases para el diseño geométrico y estructural, la señalización e iluminación según las normas internacionales, el mantenimiento preventivo y correctivo de un túnel carretero y el sistema hidráulico. La metodología implementada es mixta, incluye en la parte cuantitativa un tipo de estudio no experimental, un tipo de diseño transversal, un alcance descriptivo, un método exploratorio secuencial, un tipo de muestra no probabilística y se recopiló información con la técnica de encuesta.

Para el enfoque cualitativo se implementó la técnica de entrevista para recopilar información técnica de ingenieros civiles y así complementar la información obtenida mediante el enfoque cuantitativo. De los cuestionarios se obtuvo que el 92% de los encuestados consideran necesario la implementación de más túneles carreteros en la ciudad de San Pedro Sula y que funcionaría como alternativa para solucionar varios problemas de tránsito que actualmente se experimentan en la ciudad. El manual se basa en las normas internacionales: NHI (National Highway Institute), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el Manual de Carreteras de Perú; y las normas nacionales: SOPTRAVI (Secretaría de Estado en los Despachos de Obras Públicas, Transporte y Vivienda)."

01

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

GENERALIDADES	PG	1
FILOSOFIA DE DISEÑO	PG	7
MATERIALES	PG	8
MAQUINARIA	PG	11
VENTAJAS	PG	15
DESVENTAJAS	PG	15

GENERALIDADES

¿QUÉ ES UN TÚNEL CARRETERO?

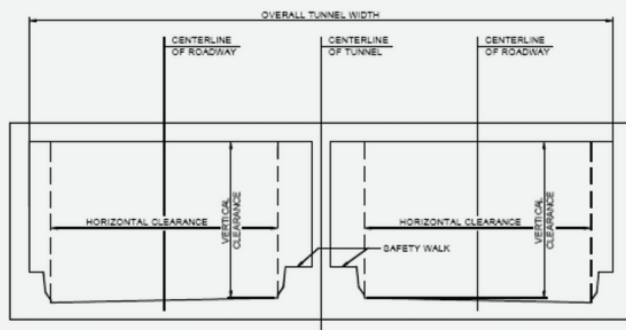
Túneles de carretera son carreteras cerradas con acceso de vehículos que es restringido a portales independientemente del tipo de estructura o método de construcción. Los túneles de carretera son alternativas viables para cruzar un cuerpo de agua o atravesar barreras físicas como montañas, carreteras, ferrocarriles o instalaciones existentes; o para satisfacer las necesidades ambientales o ecológicas. Además, los túneles de carretera son un medio viable para minimizar el impacto medioambiental potencial, como la congestión del tráfico, el movimiento de peatones, la calidad del aire, la contaminación acústica o la intrusión visual; proteger áreas de especial valor cultural o histórico como la conservación de distritos, edificios y propiedades privadas; o por otras razones de sostenibilidad, como evitar el impacto en el hábitat natural o reducir perturbación de la superficie terrestre.



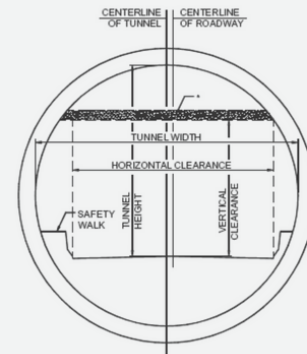
TIPOLOGÍA

Hay tres formas principales de túneles de carretera: circular, rectangular y curvilíneo o semicircular. La forma del túnel depende en gran medida del método utilizado para construir el túnel y las condiciones del terreno. Por ejemplo, los túneles rectangulares a menudo se construyen con el método de *cut and cover*, por el método sumergido o por el método de *jacked box*.

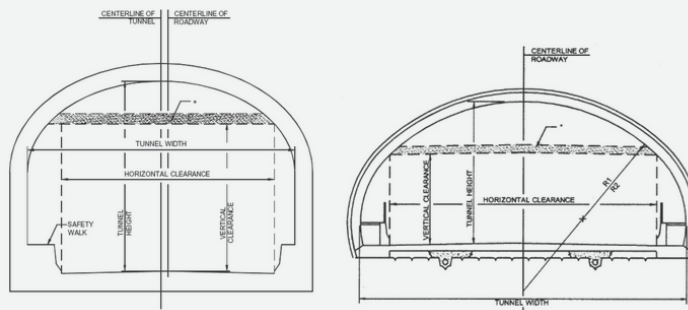
Los túneles circulares generalmente se construyen utilizando una máquina tuneladora (TBM) o por perforación y voladura en roca. Los túneles curvilíneos generalmente se construyen usando perforación y voladura en roca o siguiendo el Método de Excavación Secuencial (SEM), también conocido como Nuevo Método austriaco de construcción de túneles (NATM).



Ejemplo de túnel rectangular



Ejemplo de túnel circular



Ejemplo de túnel semicircular

El túnel se diseña para adaptarse a cualquier carretera y a vehículos de de diferente tamaño, y estas clases las analiza la AASHTO. Las alineaciones, las dimensiones y los tamaños de los vehículos suelen ser determinados por la autoridad responsable según la clasificación de la carretera, aunque existe la posibilidad de modificaciones a estar normativas mediante soluciones de ingeniería y económicas. Se deben de evaluar estas modificaciones para cumplir con la intención de los requisitos.

El tamaño y el tipo de vehículos por considerar depende de la clase de camino, y la configuración geométrica debe adaptarse a todos los vehículos potenciales incluyendo vehículos de gran altura, si es necesario. Es necesario considerar el costo de estas modificaciones de diseño para acomodar solo unos pocos vehículos extraordinarios de gran tamaño, puede no ser económico en ciertos casos.



SELECCIÓN DEL TIPO DE TÚNEL

La selección del tipo de túnel es un proceso iterativo el cual considera muchos factores, incluyendo:

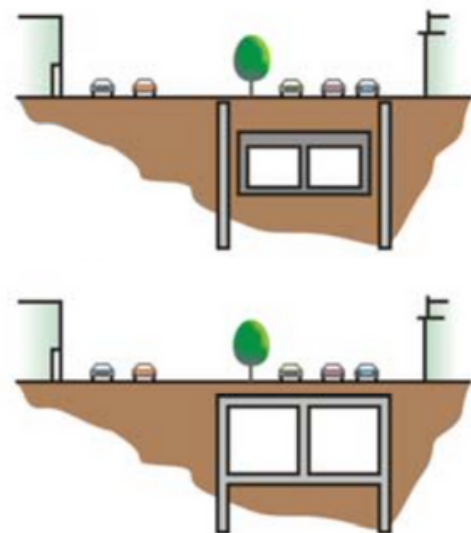
- ✓ La profundidad del túnel
- ✓ Número de carriles
- ✓ El tipo de suelo donde se construirá
- ✓ Las metodologías de construcción disponibles

Por ejemplo, un túnel de dos carriles puede ser construido con sección circular utilizando la maquina tuneladora (TBM). Para un túnel de cuatro carriles, se requiere un túnel de mayor tamaño, dos perforaciones u otro método de construcción como el "cut and cover" o los métodos "SEM".

LOS TIPOS Y MÉTODOS PRINCIPALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES UTILIZADOS ACTUALMENTE SON:

Túneles *cut and cover*:

Son construidos mediante la excavación de una zanja, después se construye la estructura de concreto dentro de la zanja, y se cubre después con el mismo suelo excavado (si las propiedades de este lo permiten). Estos pueden ser construidos por medio de concreto colocado in situ o también con secciones prefabricadas.



Túneles perforados o minados:

Construidos sin la necesidad de excavar la superficie del suelo. Estos son clasificados normalmente por el tipo de material excavado. Incluso en ocasiones existen de estos túneles que atraviesan diferentes tipos de suelos, y la mayoría de las veces resulta ser una construcción difícil de realizar.



Túneles en rocas:

Estos son excavados a través de rocas mediante el perforado, por excavadoras mecanizadas en roca más blanda, o mediante el uso de tuneladoras (TBM). En determinadas condiciones, se utiliza el método de excavación secuencial (SEM).



Túneles en terreno blando:

Se excava el suelo utilizando un escudo, TBM presurizada o método de minería como el método de excavación secuencial (SEM).



Túneles sumergidos:

Están contruidos con concreto prefabricado de gran tamaño o con elementos de concreto reforzado fabricados en seco, luego se transportan por medio de flotación hasta el sitio de construcción, se colocan en la zanja previamente excavador debajo del agua y se conectan a los elementos previamente colocados. Por último, se cubre la estructura con relleno.



Túneles *jacked box*:

Son estructuras de cajas prefabricadas colocadas horizontalmente a través del suelo, utilizando métodos para reducir la fricción superficial. Estos son utilizados a menudo en locaciones poco profundas pero que no se puede modificar la superficie, como debajo de pistas o terraplenes de vías férreas.



FILOSOFÍA DE DISEÑO

El proceso estandarizado empleado para el diseño de un túnel carretero es el siguiente:

- Definir los requisitos funcionales, incluyendo la vida útil y los requerimientos de durabilidad.
- Realizar las investigaciones y análisis necesarios de los aspectos geológicos, geotécnicos y geohidrológicos.
- Desarrollar estudios ambientales, culturales e institucionales para evaluar como impactan el diseño y construcción del túnel.
- Realizar estudios de tipo de túnel para determinar el método de tunelización más adecuado.
- Establecer criterios de diseño y realizar el diseño de los distintos elementos del túnel. El soporte del suelo inicial y final, y el sistema final de revestimiento son críticos para el diseño del túnel, considerando las condiciones del suelo como el método de construcción propuesto. Optimizar el diseño en la fase preliminar y final, realizando revisiones provisionales si así lo indican los problemas de diseño en curso.
- Determinar la alineación, el perfil y la sección transversal del túnel.
- Determinar posibles fallas en la fase de construcción, obteniendo cualquier información necesaria y analizarla para prever las fallas.
- Realizar un análisis de riesgo e identificar medidas de mitigación e implementar esas medidas en el diseño.
- Preparar los documentos del proyecto, incluyendo los planos de construcción, especificaciones, cronogramas, estimaciones e informe de línea de base geotécnica (GBR).

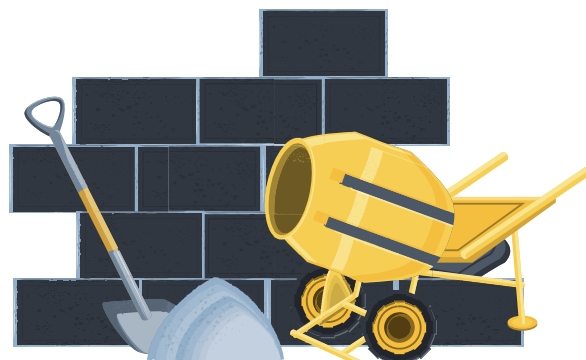
MATERIALES

El material de construcción más común utilizado en los túneles *cut and cover* es el concreto colado in situ. Sin embargo, otros materiales como el concreto premezclado pretensado, el concreto postensado y acero estructural son empleados.

CONCRETO COLADO IN SITU

Este material es el más utilizado en túneles por su facilidad de colocación en sitios con reducción de espacio. El encofrado se puede traer en pequeñas piezas manejables y ensambladas en formas dependiendo del diseño para miembros grandes y gruesos. Cuando la geometría es compleja, el concreto permite crear estos diseños, aunque el encofrado es lo difícil de construir.

El concreto es un material duradero que se desempeña bien en las condiciones que existen en las estructuras subterráneas. La baja capacidad de corte del concreto se puede compensar ensanchando las esquinas del techo y el piso.



El detallado adecuado de los miembros de concreto y la aplicación correcta según los requisitos de la AASHTO en términos del acero de refuerzo es esencial para crear una estructura duradera. Los requisitos mínimos de refuerzo de contracción deben ser tomados en consideración. Utilizando una mayor cantidad de varillas con menor diámetro en lugar de una menor cantidad de varillas con mayor diámetro ayuda a distribuir las grietas y por consecuencia se reduce el tamaño del elemento.

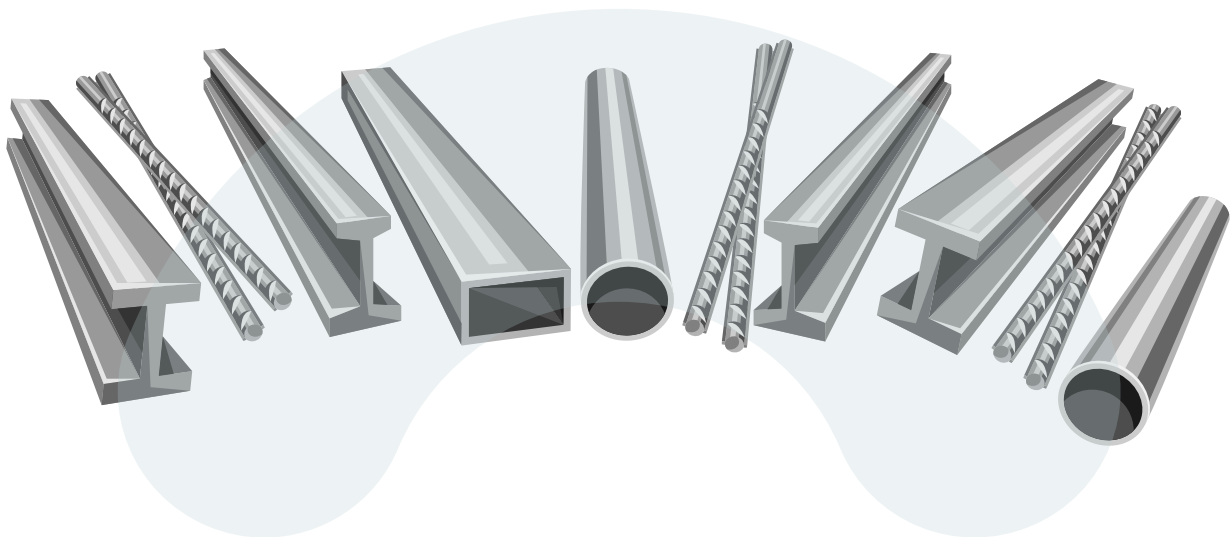
También es recomendado investigar la composición química del agua subterránea para que el concreto sea diseñado con aditivos que reduzcan potencialmente el ataque químico.

ACERO ESTRUCTURAL

El acero estructural tiene una excelente relación peso-resistencia. Vigas de acero estructural con una losa compuesta se puede utilizar para reducir el espesor de las losas del techo. Esto puede reducir la profundidad del perfil con las reducciones que acompañan al costo total del túnel asociado con una excavación menos profunda.

El acero estructural es más fácil de conectar al soporte permanente de los muros de excavación que las losas de hormigón.

Sin embargo, si la excavación del sistema de soporte tiene refuerzos internos complejos, puede que no sea posible entregar y erigir las vigas de acero dentro de la excavación que requeriría empalmar las vigas de acero. Las conexiones también requieren cuidado inspección que se suma al costo de mantenimiento futuro del túnel si las conexiones no están encerradas. La impermeabilización de las conexiones a las paredes exteriores puede resultar difícil. Los túneles suelen producir un ambiente húmedo, si se combina con la posibilidad de fugas alrededor de las conexiones, esto da como resultado condiciones que pueden resultar en una corrosión agresiva de los miembros de acero.

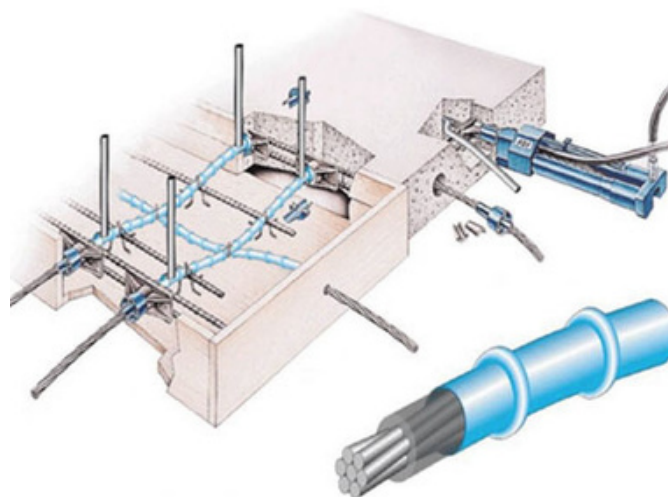


CONCRETO PRETENSADO

El hormigón pretensado, incluidas las vigas prefabricadas pretensados como las vigas AASHTO o similares, pueden ser adecuadas para grandes luces de techo cuando los espacios libres son reducidos y la profundidad total de la sección debe ser limitada. Para la losa superior se han utilizado vigas prefabricadas pretensadas apoyadas sobre muros colados in situ.

El prefabricado de vigas de hormigón, en el número y las longitudes necesarias para cortar y cubrir túneles no son prácticas de empalmar. Deben entregarse en una sola pieza y poder ser erigidos dentro del espacio disponible dentro de la excavación. Por lo tanto, el tipo y la configuración de la excavación deben considerarse al evaluar el uso de vigas prefabricadas de hormigón.

Hacer conexiones con soporte permanente de muros de excavación puede lograrse creando cavidades en las paredes para soportar las vigas en una disposición de soporte simple. Los soportes simples también requieren un método para permitir el movimiento de las vigas durante los cambios de temperatura dentro del túnel. Impermeabilizar esta conexión es difícil. Hacer una conexión requiere más detalles de la unión entre el muro y la viga para poder instalar la armadura.



MAQUINARIA

GENERALIDADES

El sistema de perforación y voladura como sistema de excavación de túneles es todavía hoy el más utilizado, debido principalmente a que puede adaptarse, con baja inversión inicial, a gran variabilidad de terrenos y secciones. Utilizándose en rocas a partir de 80.00 MPa (rotura a compresión) y desde secciones para galerías de evacuación de personal a grandes secciones en grandes cavernas. Básicamente consiste, una vez definidos un plan de tiro, adecuado a la sección y la competencia del macizo rocoso, en la realización de barrenos en el frente de ataque y en su posterior detonación que facilita el arranque de la roca para su posterior desescombro.

PERFORACIÓN

Aunque las técnicas de perforación son varias, en la ejecución de túneles, por norma general, se utiliza la perforación rotopercutiva. Se basa en la combinación de la percusión y rotación sobre la roca. La principal herramienta de perforación es el martillo. Los tipos de martillos son básicamente dos: los martillos neumáticos y los martillos hidráulicos, diferenciados por la forma como se transmite la fuerza inicial al pistón; el martillo neumático a través de aire comprimido y el martillo hidráulico a través de un caudal regulado de aceite.



EXCAVACIÓN MECÁNICA CON RETROEXCAVADORA Y MARTILLO HIDRÁULICO

A medida que la tecnología se ha desarrollado han ido dándose soluciones a las diferentes situaciones en obra. Para vencer la resistencia de la roca se emplean diferentes útiles de corte: picas, cortadores de disco, martillos picadores, ruedas dentadas y otros. La combinación de útiles de corte, campos de aplicación, sistemas de desescombro, da a lugar a diferentes soluciones que podrían agruparse en:

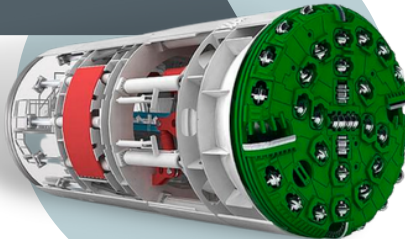
RETROEXCAVADORAS Y MARTILLO PICADOR HIDRÁULICO



ROZADORAS



TUNELADORAS (TBM)



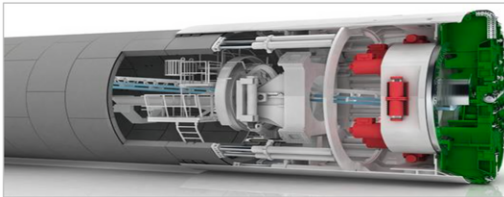
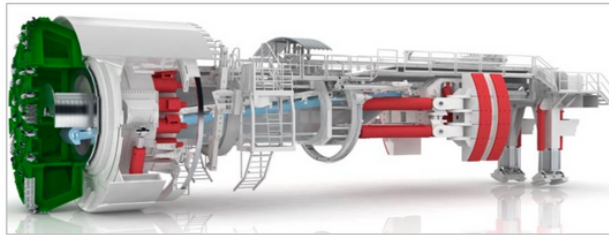
La más habitual, es la excavación mediante retroexcavadora, por su baja inversión inicial y su versatilidad en diferentes situaciones de obra, la que puede ir montada con un cazo o ripper para suelos o rocas con grado alto de meteorización, siendo lo habitual que se utilice con martillo picador (neumático o hidráulico). Este equipo de excavación se utiliza en una amplia gama de terrenos, desde suelos competentes hasta rocas competentes fuertemente fisuradas, pasando por rocas de poca competencia debido a su baja resistencia a la compresión simple.

EXCAVACIÓN CON TUNELADORAS

Son máquinas integrales de excavación a sección completa, que sostienen el terreno y evacúan los escombros, que tiene la ventaja de utilizarse en todos los terrenos. Según el tipo de terreno, se pueden clasificar en:

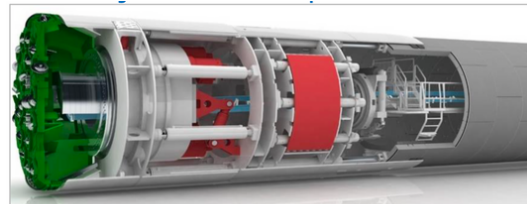
EXCAVACIÓN EN ROCA

TUNELADORA
ABIERTA (TOPO)

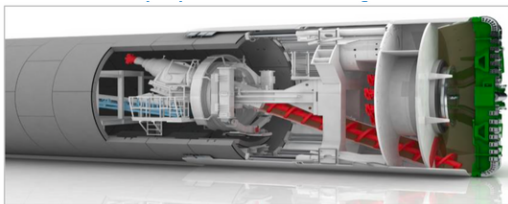


ESCUDO SIMPLE

DOBLE
ESCUDO

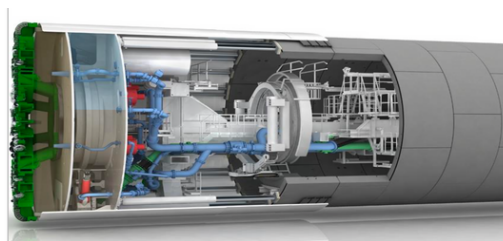


EXCAVACIÓN EN SUELOS



EPB (ESCUDO DE FRENTE
EN PRESIÓN DE TIERRAS)

HIDROESCUDOS



EXPLOSIVOS

Las características de los explosivos más destacadas serían: potencia explosiva, velocidad de detonación, densidad, presión de detonación, estabilidad, resistencia al agua, sensibilidad, humos, entre otros. Existen diferentes tipos de explosivos industriales, entre los que se destacan, explosivos con nitroglicerinas, anfo, hidrogeles, emulsiones, explosivos de seguridad, entre otros.

En la práctica habitual de los últimos años se vienen utilizando dos sistemas básicamente: sistemas eléctricos y no eléctricos. Los detonadores son los que inician la detonación del explosivo y atendiendo al tiempo de inicio de la detonación pueden ser instantáneos, retardados y microretardados. Generalmente vienen numerados y según el número corresponderá a un tiempo de retardo, fijados según cada fabricante.

La principal diferencia entre los sistemas eléctricos y no eléctricos es la manera de iniciarse el detonador. Los primeros mediante corriente eléctrica y los segundos mediante una onda de choque. Esto hace que los sistemas no eléctricos se vayan imponiendo en las obras, debido a las ventajas en seguridad que proporcionan



VENTAJAS

- Descongestionamiento vehicular
- Mejora la calidad del aire
- Reduce el ruido nocivo
- Minimiza la intervención de la superficie
- Mejora el medioambiente

Los túneles de carretera son más amigables con el medio ambiente que otras instalaciones de superficie. La congestión del tráfico sería reducida en las calles locales. La calidad del aire mejoraría porque los contaminantes generados por el tráfico son capturados y eliminados del público. Del mismo modo, se reduciría el ruido y la estética visual y se mejoraría el uso de la tierra. Al colocar el tráfico bajo tierra, los valores de las propiedades mejorarían y las comunidades se verían menos afectadas a largo plazo.

DESVENTAJAS

Al planificar un túnel, el impacto de la construcción en la comunidad y el medio ambiente es importante. Temas como impacto en el tráfico, negocios, instalaciones institucionales, hospitales, servicios públicos y residencias se deben de considerar en la planeación de un túnel. El ruido por las maquinas, el polvo, las vibraciones, la calidad del agua, la estética y la congestión del tráfico durante la construcción son problemas que se abordan en la planeación de un túnel para así mitigar el impacto.

Por ejemplo, para un túnel *cut and cover* se requiere excavar, y esto impacta en el tráfico vehicular, los servicios públicos pueden ser temporalmente deshabilitados y las instalaciones cercanas.

CAPÍTULO 2

ESTUDIOS GEOLÓGICOS - GEO TÉCNICOS

02

ESTUDIOS GEOLOGICOS - PG 17
GEOTECNICOS

ENSAYOS IN SITU PG 18

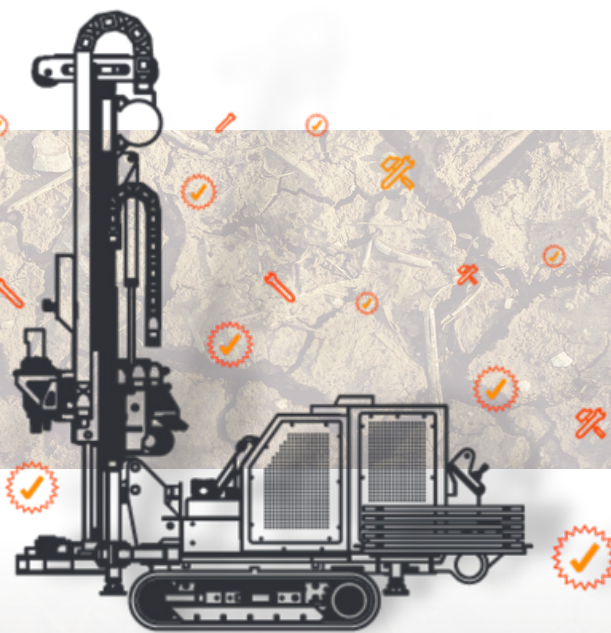
ENSAYOS DE PG 19
LABORATORIO

SUELOS DE SAN PEDRO PG 20
SULA

02

ESTUDIOS GEOLÓGICOS - GEOTÉCNICOS

Ensayos e investigaciones geotécnicas son críticas para la correcta planeación de un túnel. La selección del alineamiento, la sección transversal, y los métodos de construcción son influenciados por las condiciones geológicas y geotécnicas, así como las dificultades del sitio. Un conocimiento lo mas exacto posible de las condiciones geológicas esperadas es esencial. El tipo de suelo encontrado en todo el alineamiento del túnel afectaría tanto la selección del tipo de túnel como el método de construcción. La selección del perfil del túnel debe considerar posibles movimientos de suelos y así evitar locaciones en donde estos movimientos pueden afectar gravemente las instalaciones existentes y lo existente en la superficie.



ENSAYOS IN SITU

ENSAYOS PARA SUELOS

Los ensayos de suelos realizados in situ incluyen:

- Ensayo de Penetración Estándar - AASHTO T 206 - (**ASTM D 1586**)
- Ensayo de Penetración Estática (Cono Estático) - **ASTM D 3441**
- Ensayo del Molinete - AASHTO T 223 - (**ASTM D 2573**)
- Ensayo Presiométrico - **ASTM D 4719**
- Ensayo con Placa de Carga - AASHTO T 235 - (**ASTM D 1194**)
- Ensayo de Pozo (Permeabilidad) - **ASTM D 4750**

ENSAYOS PARA ROCAS

Los ensayos realizados in situ pueden incluir:

- Deformabilidad y resistencia de rocas débiles mediante un ensayo de compresión uniaxial in situ - **ASTM D 4555**.
- Determinación de la resistencia al corte directo de las discontinuidades de las rocas - **ASTM D 4554**
- Módulo de deformación de una masa de roca usando el método de la placa de carga flexible - **ASTM D 4395**
- Módulo de deformación de una masa de roca usando un ensayo de tesado radial - **ASTM D 4506**
- Módulo de deformación de una masa de roca usando el método de la placa de carga rígida - **ASTM D 4394**
- Determinación de la tensión y el módulo de deformación utilizando el método del gato plano - **ASTM D 4729**
- Tensión en rocas usando el método de fractura hidráulica - **ASTM D 4645**

ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYOS PARA SUELOS

Los ensayos de suelos realizados en laboratorio pueden incluir:

- Contenido de agua - **ASTM D 4643**
- Gravedad específica - AASHTO T 100 - (**ASTM D - 854**)
- Distribución granulométrica - AASHTO T 88 - (**ASTM D 422**)
- Límite líquido y límite plástico - AASHTO T 90 - (**ASTM D 4318**)
- Ensayo de corte directo - AASHTO T 236 - (**ASTM D 3080**)
- Ensayo de compresión no confinado - AASHTO T 208 - (**ASTM D 2166**)
- Ensayo triaxial no consolidado no drenado - **ASTM D 2850**
- Ensayo triaxial consolidado no drenado - AASHTO T 297 - (**ASTM D 4767**)
- Ensayo de consolidación - AASHTO T 216 - (**ASTM D 2435** o **D 4186**)
- Ensayo de permeabilidad - AASHTO T 215 - (**ASTM D 2434**)

ENSAYOS PARA ROCAS

Los ensayos de rocas realizados en laboratorio pueden incluir:

- Determinación de módulos de elasticidad - **ASTM D 3148**
- Ensayo de compresión triaxial - AASHTO T 266 (**ASTM D 2664**)
- Ensayo de compresión no confinada - **ASTM D 2938**
- Ensayo de resistencia a la tracción por compresión diametral - **ASTM D 3967**

SUELOS DE SAN PEDRO SULA

El estudio de suelos desempeña un papel fundamental en toda obra de construcción civil ya que toda estructura dependerá del tipo de suelo sobre el cual este cimentado. Conocer el suelo sobre el cual se edifica ofrece una serie de ventajas que hacen más eficientes los procesos de diseño, presupuestos y construcción de obras.

Los resultados y conclusiones que se presentan a continuación, son producto de la realización de las pruebas de laboratorio necesarias para poder clasificar los suelos por medio del método del **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**.

El proyecto fue dividido en cuatro fases, una por cada zona que se pretendió analizar de la ciudad y cada zona fue dividida en cuadrantes y sub-cuadrante. Cada cuadrante consta de 9 km² y cada sub-cuadrante consta de 1 km² respectivamente. En la siguiente ilustración se puede apreciar mejor la ubicación de cada uno de estos cuadrantes:

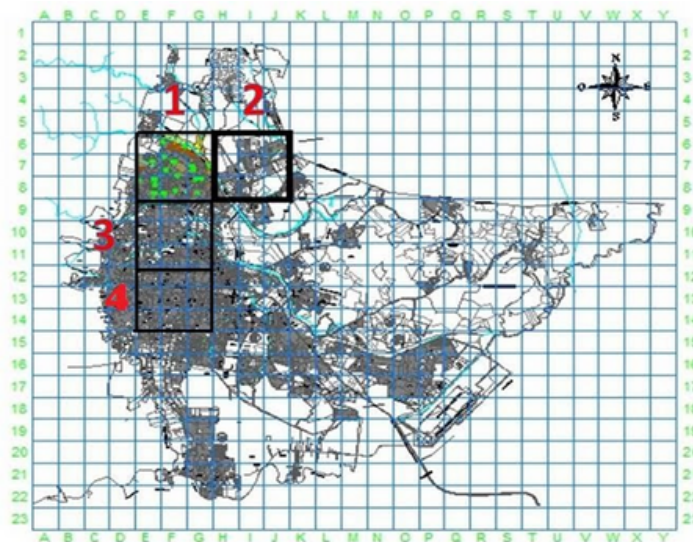


Ilustración 1 - Mapa de los cuadrantes estudiados, San Pedro Sula

SECTOR NOROESTE

En lo que recae a la clasificación de suelos, a continuación, se presenta la tabla de resultados obtenidos mediante los sondeos hechos en el primer cuadrante, correspondiente a la fase uno, haciendo referencia a la zona noroeste de la ciudad de San Pedro Sula:

# Sondeo	Ubicación	Clasificación SUCS	Descripción
S1	Cruce entre Boulevard Mackey y Armenta	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S2	Altara	SP	Arena mal graduada
S3	Villas Mackey	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S4	Los Alamos #1	SM	Arena limosa
S5	Rio Blanco	SP	Arena mal graduada
S6	Lomas del Pedregal	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S7	Colvisula	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S8	La Tara	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S9	Puente La Morgue	SW-SM	Arena bien graduada con limo
S10	Los Alpes	SM	Arena limosa
S11	Boulevard Los Alpes	SM	Arena limosa
S12	Casa Maya II #1	SW	Arena bien graduada
S13	Los Alamos #2	SM	Arena limosa
S14	Los Alamos #3	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S15	Detras de parque Villas Mackey	SM	Arena limosa
S16	Casa Maya II #2	SM	Arena limosa
S17	La Foresta #1	SP-SM	Arena mal graduada con limo
S18	La Foresta #2	SM	Arena limosa
S19	Boulevard Mackey	SM	Arena limosa
S20	Sitraunah	SM	Arena limosa

Ilustración 2 - Clasificación SUCS del Cuadrante #1 (Noroeste)

Al estar más cerca de los ríos y de los acuíferos de la ciudad, los suelos de la zona noroeste constan en su totalidad de arena, como se puede apreciar en la Ilustración, se hicieron 20 sondeos y se encontraron en su mayoría arenas con presencia de limo a 1 metro de profundidad.

SECTOR NORESTE

A continuación, se presenta la tabla de resultados obtenidos mediante los sondeos hechos en el segundo cuadrante, correspondiente a la fase dos, haciendo referencia a la zona noreste de la ciudad de San Pedro Sula:

CALICATAS	UBICACIÓN	UTM	SUCS	DESCRIPCION
S1	Col. Fesitrahñ	N 1720922 E 392952	SM	Arena limosa
S2	Col. Fesitrahñ	N 1720545 E 393530	SM	Arena limosa
S3	Col. Fesitrahñ	N 1721055 E 393615	SP-SM	Arena mal graduada con
S4	Col. Fesitrahñ	N 1720951 E 394169	SW-SM	Arena bien graduada con
S5	Col. Fesitrahñ	N 1720201 E 393748	SP-SM	Arena mal graduada con
S6	Col. Las Mercedes	N 1719823 E 392988	SP-SM	Arena mal graduada con
S7	Col. Santa Monica	N 1720582 E 392582	SP-SM	Arena mal graduada con
S8	Col. Santa Monica	N 1721271 E 392546	SM	Arena limosa
S9	Col. Santa Monica	N 1720249 E 392725	SM	Arena limosa
S10	El Zapotal	N 1721498 E 391485	SP-SM	Arena mal graduada con
S11	El Zapotal	N 1721026 E 391753	SM	Arena limosa
S12	El Zapotal	N 1720232 E 392168	SM	Arena limosa

CALICATAS	UBICACIÓN	UTM	SUCS	DESCRIPCION
S13	Rio Blanco	N 1719500 E 392037	SM	Arena limosa
S14	Rio Blanco	N 1710919 E 392011	SM	Arena limosa
S15	UNITEC	N 1720271 E 393133	SM	Arena limosa
S16	Col. Los Robles	N 1718580 E 391814	SP	Arena mal graduada
S17	Bordo Rio Blanco aguas	N 1718898 E 392106	SM	Arena limosa
S18	Bulevar del Norte	N 1719328 E 392158	SP	Arena mal graduada
S19	2do anillo	N 1718644 E 392913	SM	Arena limosa
S20	Bulevar del Norte (desvio)	N 1719771 E 393082	SP-SM	Arena mal graduada con
S21	Cancha Rancho Tara	N 1719882 E 393478	SM	Arena limosa
S22	Res. Villas del Bosque	N 1718723 E 394517	SW	Arena bien graduada
S23	Calle hacia Campisa	N 1719385 E 394139	GW	Grava bien graduada
S24	Colindancia Juan Ramon	N 1719978 E 393873	SW	Arena bien graduada
S25	Bulevar del Norte (peaje)	N 1720351 E 394182	SM	Arena limosa

Ilustración 3 - Clasificación SUCS del Cuadrante #2 (Noreste)

Nuevamente, al estar más cerca de los ríos, los suelos de la zona noreste constan en su totalidad de arena, como se puede apreciar en la Ilustración, se hicieron 25 sondeos y se encontraron en su mayoría arenas con presencia de limo a 1 metro de profundidad. Se tomaron puntos de referencia muy conocidos por la población sampedrana.

SECTOR SUROESTE

En la fase tres del estudio, se logró determinar el tipo de suelo existente en cada uno de los sondeos ubicados en la zona suroeste de la ciudad.

La zona de estudio que abarca esta investigación en su fase tres, contempla siempre el sector noroeste de la ciudad abarcando colonias como: La Colonia Bográn, Los Alpes, Jardines del Valle, Villas del Sol, Colonia Las Brisas, Colonia Villa Florencia, Avenida Junior, Colonia Buenos Aires, El Palenque entre otras.

De las pruebas realizadas a los 25 sondeos en los diferentes cuadrantes se obtuvieron las siguientes caracterizaciones (en base a la clasificación SUCS):

CALICATAS	UBICACION	SUCS	DESCRIPCION
S1	Puente Rio Bermejo	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S2	Puente Los Alpes	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S3	FUNADEH	SP	Arena Mal Graduada
S4	Hospital Mario Catarino Rivas	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S5	Edificio Panorama	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S6	Leche Sula	SP	Arena Mal Graduada
S7	Saint Peter's Academy	SW	Arena Bien Graduada
S8	Ministerio Dioses Bendicion	SW	Arena Bien Graduada
S9	Expocentro	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S10	Villa Florencia	SW-SM	Arena Bien Graduada con Limo
S11	Parque Benito Juarez	SM	Arena Limosa
S12	Entre 23 y 21 Avenida NO	SM	Arena Limosa

CALICATAS	UBICACION	SUCS	DESCRIPCION
S13	Avenida Junior 11 y 12 Calle NE	SM	Arena Limosa
S14	Empacadora Continental	SM	Arena Limosa
S15	Pricesmart	SM	Arena Limosa
S16	Punto de las Ceramicas	SW-SM	Arena Bien Graduada con Limo
S17	Cerveceria	SM	Arena Limosa
S18	Mall Galerias del Valle	SW-SM	Arena Bien Graduada con Limo
S19	Jardines Bar Grill	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S20	Colonia Jardines del Valle	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S21	Colonia Buenos Aires	SM	Arena Limosa
S22	Colonia Bogran	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S23	Hospital del Valle	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S24	El Palenque	SW	Arena Bien Graduada
S25	Colonia Los Laureles	SW	Arena Bien Graduada

Ilustración 4 - Clasificación SUCS del Cuadrante #3 (Suroeste)

SECTOR SUROESTE

En la fase cuatro del estudio, se continuo determinando el tipo de suelo existente en cada uno de los sondeos realizados en la zona suroeste de la ciudad.

La zona de estudio que abarca esta investigación en su fase cuatro, contempla siempre el sector suroeste de la ciudad abarcando colonias como: Barrio Paz Barahona, Barrio Barandillas, Sector Suncery, Col. Altamira y Trejo, Barrio Los Andes, Barrio Guamilito, Barrio Santa Ana, y parte del Centro de San Pedro Sula.

De las pruebas realizadas a los 25 sondeos en los diferentes cuadrantes se obtuvieron las siguientes caracterizaciones (en base a la clasificación SUCS):

CALICATAS	UBICACION	SUCS	DESCRIPCION
S1	Instituto La Salle	SW	Arena Bien Graduada
S2	Entre 2 y 3 Calle NO	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S3	Frente al Geminis	SP	Arena Mal Graduada
S4	Hotel Bolivar	SW-SM	Arena Bien Graduada con Limo
S5	Edificio INTAE	SP	Arena Mal Graduada
S6	Los Andes	SP	Arena Mal Graduada
S7	Taller de Mecanica	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S8	Siemens	SP	Arena Mal Graduada
S9	Taller Automotriz	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S10	Colonia Smith	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S11	Leyde	SP	Arena Mal Graduada
S12	Barrio Rio de Piedras	SW	Arena Bien Graduada

CALICATAS	UBICACION	SUCS	DESCRIPCION
S13	Colonia Trejo	SW	Arena Bien Graduada
S14	Hotel Copantl	SW-SM	Arena Bien Graduada con Limo
S15	Parque Audi Usados	SP	Arena Mal Graduada
S16	Carwash Machado	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S17	Barrio Paz Barahona	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S18	IHNFA	SW-SM	Arena Bien Graduada con Limo
S19	Barrio Las Palmas	SW	Arena Bien Graduada
S20	SERMAPLAST	SW	Arena Bien Graduada
S21	Centro Penal	SM	Arena Limosa
S22	Pasaje 14 de julio	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo
S23	Colonia Altamira	SP	Arena Mal Graduada
S24	Colonia Montefresco	SM	Arena Limosa
S25	Barrio Concepcion	SP-SM	Arena Mal Graduada con Limo

Ilustración 5 - Clasificación SUCS del Cuadrante #4 (Suroeste)

CAPÍTULO 3

03

CLASIFICACIÓN GEO MECÁNICA

DESIGNACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ROCA (RQD)	PG 26
CLASIFICACIÓN DE BIENIAWSKI (RMR)	PG 27
CLASIFICACIÓN DE BARTON (Q)	PG 28
CORRELACIÓN ENTRE RMR Y Q	PG 32
EJEMPLO DE APLICACIÓN	PG 34

03

DESIGNACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ROCA (RQD)

Proceso que utiliza la calidad de las muestras de perforación (sondajes) diamantina (Deere et al, 1967) para determinar la calidad de la roca masiva in situ. Normalmente muestras de 54.7 mm x 1.5 m, resultando en un porcentaje como el siguiente:

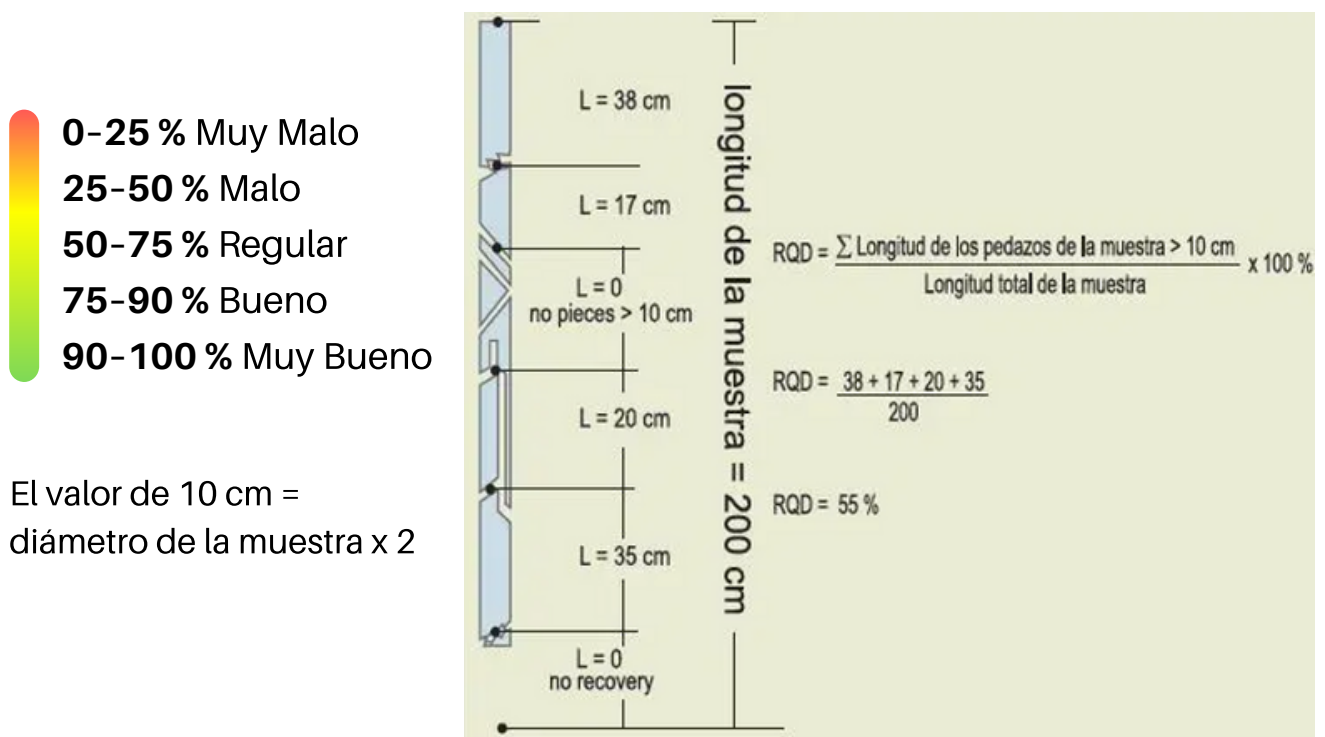


Ilustración 6 - Cálculo del RQD

Utilizando el sistema RQD se tiene una indicación de la calidad de la roca en el área de la muestra, la existencia de fallas, fracturas presentes y de las fuerzas presente en la roca.

CLASIFICACIÓN DE BIENIAWSKI (RMR)

El índice RMR evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de los parámetros siguientes:

- Resistencia a compresión simple de la roca matriz
- Índice RQD
- Separación de las diaclasas
- Estado de las discontinuidades
- Presencia de agua
- Orientación de las discontinuidades respecto el eje

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Tabla 1 - Clasificación de la roca según el índice RMR

Con los primeros cinco parámetros se obtiene una puntuación que oscila entre 0 - 100 puntos que establece el índice RMR básico, normalmente en fase de proyecto. El parámetro 6 de orientación de discontinuidades es un factor de corrección que, en caso de túneles, ya que el RMR puede aplicarse también a taludes y cimentaciones, es de 12 como máximo. Cuando se tiene en cuenta el factor de corrección se habla de un RMR corregido, normalmente en fase de obra. Bieniawsky también relaciona un tiempo de estabilidad sin sostenimiento y su longitud, con una cohesión estimada del macizo rocoso y un ángulo de rozamiento asociado. Siendo también posible establecer relación con el módulo de deformación del macizo rocoso.

CLASIFICACIÓN DE BARTON (Q)

El sistema de clasificación geomecánicas de Barton conocido como la Q de Barton fue desarrollado por Barton, Lien y Lunde en 1974, aunque posteriormente se han ido realizando modificaciones y actualmente se utiliza una modificación del año 2000. A modo similar al índice RMR, clasifica al macizo rocoso con el índice Q que oscila exponencialmente, a diferencia del RMR que es lineal, entre 0.001 y 1000.

Su fórmula es:

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \times \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \times \left[\frac{J_w}{SRF} \right]$$

Ecuación 1 - Formula de Barton

Donde

J_n = índice de diaclasado que indica el grado de fracturación del macizo

J_r = índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas

J_a = índice que indica la alteración de las discontinuidades

J_w = coeficiente reductor por la presencia de agua

SRF = coeficiente dependiente del estado tensional existente

La siguiente tabla da la clasificación de los parámetros individuales utilizados para obtener el Índice de Calidad de Túneles (Q) para un macizo rocoso. Hay que tener en cuenta que Barton ha incorporado la evaluación de más de 1000 túneles en el desarrollo del sistema Q:

Tabla 2 - Parámetros individuales del sistema Q (continuación)

DESCRIPTION	VALUE	NOTES
1. ROCK QUALITY DESIGNATION	RQD	
A. Very poor	0 - 25	1. Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q.
B. Poor	25 - 50	
C. Fair	50 - 75	
D. Good	75 - 90	2. RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90 etc. are sufficiently accurate.
E. Excellent	90 - 100	
2. JOINT SET NUMBER	J_n	
A. Massive, no or few joints	0.5 - 1.0	
B. One joint set	2	
C. One joint set plus random	3	
D. Two joint sets	4	
E. Two joint sets plus random	6	
F. Three joint sets	9	1. For intersections use $(3.0 \times J_n)$
G. Three joint sets plus random	12	
H. Four or more joint sets, random, heavily jointed, 'sugar cube', etc.	15	2. For portals use $(2.0 \times J_n)$
J. Crushed rock, earthlike	20	
3. JOINT ROUGHNESS NUMBER	J_r	
a. Rock wall contact		
b. Rock wall contact before 10 cm shear		
A. Discontinuous joints	4	
B. Rough and irregular, undulating	3	
C. Smooth undulating	2	
D. Slickensided undulating	1.5	1. Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m.
E. Rough or irregular, planar	1.5	
F. Smooth, planar	1.0	
G. Slickensided, planar	0.5	2. $J_r = 0.5$ can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided that the lineations are oriented for minimum strength.
c. No rock wall contact when sheared		
H. Zones containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
J. Sandy, gravely or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
4. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ_r degrees (approx.)
a. Rock wall contact		
A. Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling	0.75	1. Values of ϕ_r , the residual friction angle, are intended as an approximate guide to the mineralogical properties of the alteration products, if present.
B. Unaltered joint walls, surface staining only	1.0	25 - 35
C. Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0	25 - 30
D. Silty-, or sandy-clay coatings, small clay-fraction (non-softening)	3.0	20 - 25
E. Softening or low-friction clay mineral coatings, i.e. kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum and graphite etc., and small quantities of swelling clays. (Discontinuous coatings, 1 - 2 mm or less)	4.0	8 - 16

Tabla 2 - Parámetros individuales del sistema Q (continuación)

4, JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ degrees (approx.)	
b. Rock wall contact before 10 cm shear			
F. Sandy particles, clay-free, disintegrating rock etc.	4.0	25 - 30	
G. Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	6.0	16 - 24	
H. Medium or low over-consolidation, softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	8.0	12 - 16	
J. Swelling clay fillings, i.e. montmorillonite, (continuous < 5 mm thick). Values of J_a depend on percent of swelling clay-size particles, and access to water.	8.0 - 12.0	6 - 12	
c. No rock wall contact when sheared			
K. Zones or bands of disintegrated or crushed	6.0		
L. rock and clay (see G, H and J for clay	8.0		
M. conditions)	8.0 - 12.0	6 - 24	
N. Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction, non-softening	5.0		
O. Thick continuous zones or bands of clay	10.0 - 13.0		
P. & R. (see G,H and J for clay conditions)	6.0 - 24.0		
5. JOINT WATER REDUCTION	J_w	approx. water pressure (kgf/cm ²)	
A. Dry excavation or minor inflow i.e. < 5 l/m locally	1.0	< 1.0	
B. Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.66	1.0 - 2.5	
C. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5	2.5 - 10.0	1. Factors C to F are crude estimates; increase J_w if drainage installed.
D. Large inflow or high pressure	0.33	2.5 - 10.0	
E. Exceptionally high inflow or pressure at blasting, decaying with time	0.2 - 0.1	> 10	2. Special problems caused by ice formation are not considered.
F. Exceptionally high inflow or pressure	0.1 - 0.05	> 10	
6. STRESS REDUCTION FACTOR		SRF	
a. Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated			
A. Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock any depth)		10.0	1. Reduce these values of SRF by 25 - 50% but only if the relevant shear zones influence do not intersect the excavation
B. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth < 50 m)		5.0	
C. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth > 50 m)		2.5	
D. Multiple shear zones in competent rock (clay free), loose surrounding rock (any depth)		7.5	
E. Single shear zone in competent rock (clay free). (depth of excavation < 50 m)		5.0	
F. Single shear zone in competent rock (clay free). (depth of excavation > 50 m)		2.5	
G. Loose open joints, heavily jointed or 'sugar cube', (any depth)		5.0	

Tabla 2 - Parámetros individuales del sistema Q (continuación)

DESCRIPTION	VALUE		NOTES
6. STRESS REDUCTION FACTOR			SRF
<i>b. Competent rock, rock stress problems</i>			
	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	
H. Low stress, near surface	> 200	> 13	2.5
J. Medium stress	200 - 10	13 - 0.66	1.0
K. High stress, very tight structure (usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability)	10 - 5	0.66 - 0.33	0.5 - 2
L. Mild rockburst (massive rock)	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10
M. Heavy rockburst (massive rock)	< 2.5	< 0.16	10 - 20
<i>c. Squeezing rock, plastic flow of incompetent rock under influence of high rock pressure</i>			
N. Mild squeezing rock pressure			5 - 10
O. Heavy squeezing rock pressure			10 - 20
<i>d. Swelling rock, chemical swelling activity depending on presence of water</i>			
P. Mild swelling rock pressure			5 - 10
R. Heavy swelling rock pressure			10 - 15
ADDITIONAL NOTES ON THE USE OF THESE TABLES			
When making estimates of the rock mass Quality (Q), the following guidelines should be followed in addition to the notes listed in the tables:			
1. When borehole core is unavailable, RQD can be estimated from the number of joints per unit volume, in which the number of joints per metre for each joint set are added. A simple relationship can be used to convert this number to RQD for the case of clay free rock masses: $RQD = 115 - 3.3 J_v$ (approx.), where J_v = total number of joints per m^3 ($0 < RQD < 100$ for $35 > J_v > 4.5$).			
2. The parameter J_n representing the number of joint sets will often be affected by foliation, schistosity, slaty cleavage or bedding etc. If strongly developed, these parallel 'joints' should obviously be counted as a complete joint set. However, if there are few 'joints' visible, or if only occasional breaks in the core are due to these features, then it will be more appropriate to count them as 'random' joints when evaluating J_n .			
3. The parameters J_r and J_a (representing shear strength) should be relevant to the weakest significant joint set or clay filled discontinuity in the given zone. However, if the joint set or discontinuity with the minimum value of J_r/J_a is favourably oriented for stability, then a second, less favourably oriented joint set or discontinuity may sometimes be more significant, and its higher value of J_r/J_a should be used when evaluating Q. The value of J_r/J_a should in fact relate to the surface most likely to allow failure to initiate.			
4. When a rock mass contains clay, the factor SRF appropriate to loosening loads should be evaluated. In such cases the strength of the intact rock is of little interest. However, when jointing is minimal and clay is completely absent, the strength of the intact rock may become the weakest link, and the stability will then depend on the ratio rock-stress/rock-strength. A strongly anisotropic stress field is unfavourable for stability and is roughly accounted for as in note 2 in the table for stress reduction factor evaluation.			
5. The compressive and tensile strengths (σ_c and σ_t) of the intact rock should be evaluated in the saturated condition if this is appropriate to the present and future in situ conditions. A very conservative estimate of the strength should be made for those rocks that deteriorate when exposed to moist or saturated conditions.			

CORRELACIÓN ENTRE RMR Y Q

Dada la implantación que tienen hoy en día los sistemas de clasificación de macizos rocosos RMR y Q, y su aplicación en gran cantidad de obras subterráneas con variadas condiciones de litologías, calidad de rocas, dimensiones o profundidad, se desarrollaron fórmulas comparativas de ambas clasificaciones.

El sistema desarrollado por Barton parece más completo, pero cabe decir que la orientación y el buzamiento de las discontinuidades no se tienen tan en cuenta como en el sistema RMR. Desde su desarrollo en la década de los años 70, diferentes autores, en base a sus experiencias y estudios, desarrollaron fórmulas comparativas de las dos clasificaciones:

- $RMR = 9 \ln Q + 44$ **Bieniawski** (1976)
- $RMR = 13.5 \ln Q + 43$ **Ruteledge** (1978)
- $RMR = 12.5 \ln Q + 55.2$ **Moreno** (1980)
- $RMR = 10.53 \ln Q + 41.83$ **Abad** (1983)
- $RMR = 15 \ln Q + 50$ **Barton** (1995)

Teniendo ya sea el índice Q o la clasificación RMR en mano se puede determinar el tipo de sostenimiento más adecuado mediante el siguiente gráfico:

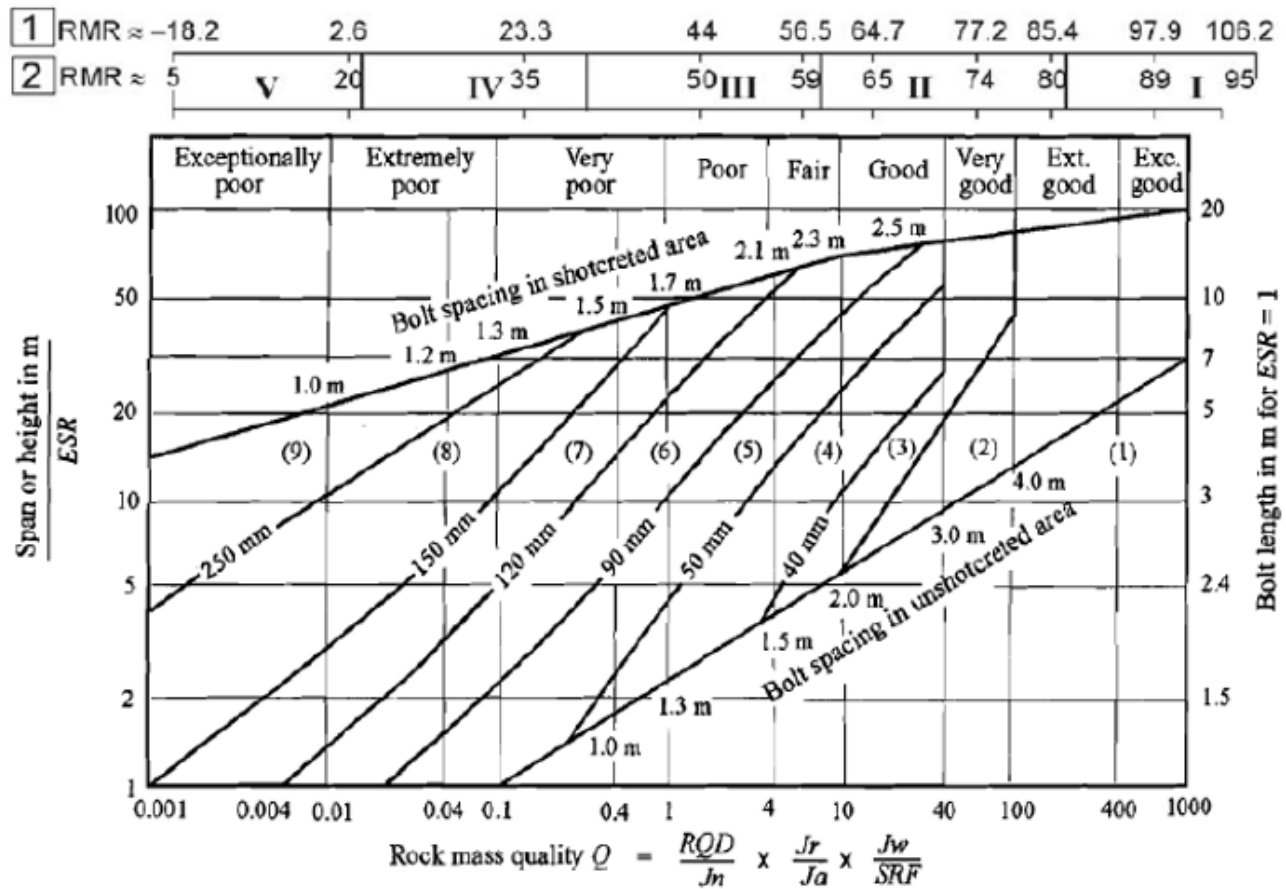


Grafico 1 - Determinación del soporte del túnel

Categorías de refuerzo:

- Sin soporte (1)
- Atornillado por puntos (2)
- Atornillado sistemático (3)
- Atornillado sistemático con hormigón proyectado no reforzado de 40-100 mm (4)
- Hormigón proyectado reforzado con fibra 50-90 mm y atornillado (5)
- Hormigón proyectado reforzado con fibra 90-120 mm y atornillado (6)
- Hormigón proyectado reforzado con fibra de 120-150 mm y atornillado (7)
- Hormigón proyectado reforzado con fibra > 150 mm con nervios reforzados de hormigón proyectado y atornillado (8)
- Revestimiento de hormigón fundido (9)

EJEMPLO DE APLICACIÓN

A continuación, se presenta un ejemplo en cual se aplican los tres métodos explicados en los anteriores apartados mostrando como cada uno se correlaciona y llegan a una misma conclusión. Cabe recalcar que esta metodología solo aplica si el túnel carretero a diseñar es un terreno que se compone en su totalidad por macizo rocoso.

RQD

Se describe el RQD como la longitud (como porcentaje de la longitud total del núcleo) de los trozos de núcleo intactos y sanos que tienen 4 in (10 cm) o más de longitud. Se tomarán en cuenta los siguientes datos:

- L1 = 38 cm
- L2 = 17 cm
- L3 = 20 cm
- L4 = 35 cm
- Longitud total de la muestra = 200 cm

Enseguida se suman las longitudes intactas que resultaron de la muestra y se dividen entre la longitud total de la muestra extraída en un principio, como se muestra a continuación:

$$\text{RQD} = \frac{(38 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 20 \text{ cm} + 35 \text{ cm})}{200 \text{ cm}} \times 100\% = 55\%$$

Se concluye que la calidad de la roca es **Regular**.

Sistema Q de Barton

La evaluación de los parámetros Q y el uso de la tabla 2 pueden ilustrarse considerando un tramo de túnel con las siguientes propiedades, entre ellas, el RQD anteriormente calculado:

- RQD = 55%
- Conjuntos de articulaciones (J_n) = 6
- Rugosidad de las juntas (J_r) = 2
- Alteración de la junta (J_a) = 2
- Factor de reducción de agua en las juntas (J_w) = 0.66
- Factor de reducción de tensión (SRF) = 1.0

Una vez establecidos los parámetros, se calcula Q aplicando la ecuación 1:

$$Q = \left(\frac{\text{RQD}}{J_n}\right) \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \left(\frac{J_w}{\text{SRF}}\right) = \left(\frac{55}{6}\right) \left(\frac{2}{2}\right) \left(\frac{0.66}{1}\right) = 6.05$$

Sistema de clasificación de la masa de la roca (RMR):

Existen diferentes formas de determinar el valor del RMR, hasta la fecha existen ecuaciones tanto lineales como lineales que utilizan el valor de Q previamente obtenido para encontrar el RMR lo más rápido posible, sin necesidad de utilizar tablas o gráficos.

El mismo Barton brinda una ecuación que desarrollo en 1995 en base a ecuaciones previamente estipuladas por otros científicos, esa ecuación es la siguiente:

Recordando que el índice Q calculado fue 6.05.

$$\text{RMR} = 15(\text{Ln}(Q)) + 50 = 15(\text{Ln}(6.05)) + 50 = 77$$

Según la clasificación de la tabla 1, el macizo rocoso es **Clase II**, lo que significa que su calidad es buena.

El sostenimiento de un túnel carretero lo definen varios factores, algunos pueden sugerirse a medida que avanza la excavación en el túnel sin necesidad de aplicar métodos matemáticos, sin embargo, siempre es recomendable elegir el mejor sostenimiento y revestimiento en base a los valores obtenidos mediante las pruebas geológicas y geotécnicas hechas en el terreno.

Un valor necesario para determinar el sostenimiento es el ESR, el cual se puede determinar tomando en cuenta la siguiente tabla:

Descripción	ESR
Galerías temporales de minas	3-5
Pozos verticales circulares/rectangulares	2.5/2
Galerías permanentes en minas; túneles hidráulicos, galerías piloto o galerías de avance	1.6
Cavernas pequeñas, túneles de acceso, túneles de carretera o FFCC poco importantes	1.3
Cavernas, túneles de carretera o FCC, boquillas, intersecciones	1.0
Cavernas para fábricas, centrales, estaciones de ferrocarril, plantas nucleares	0.8

Tabla 3 - Determinación del ESR según Barton

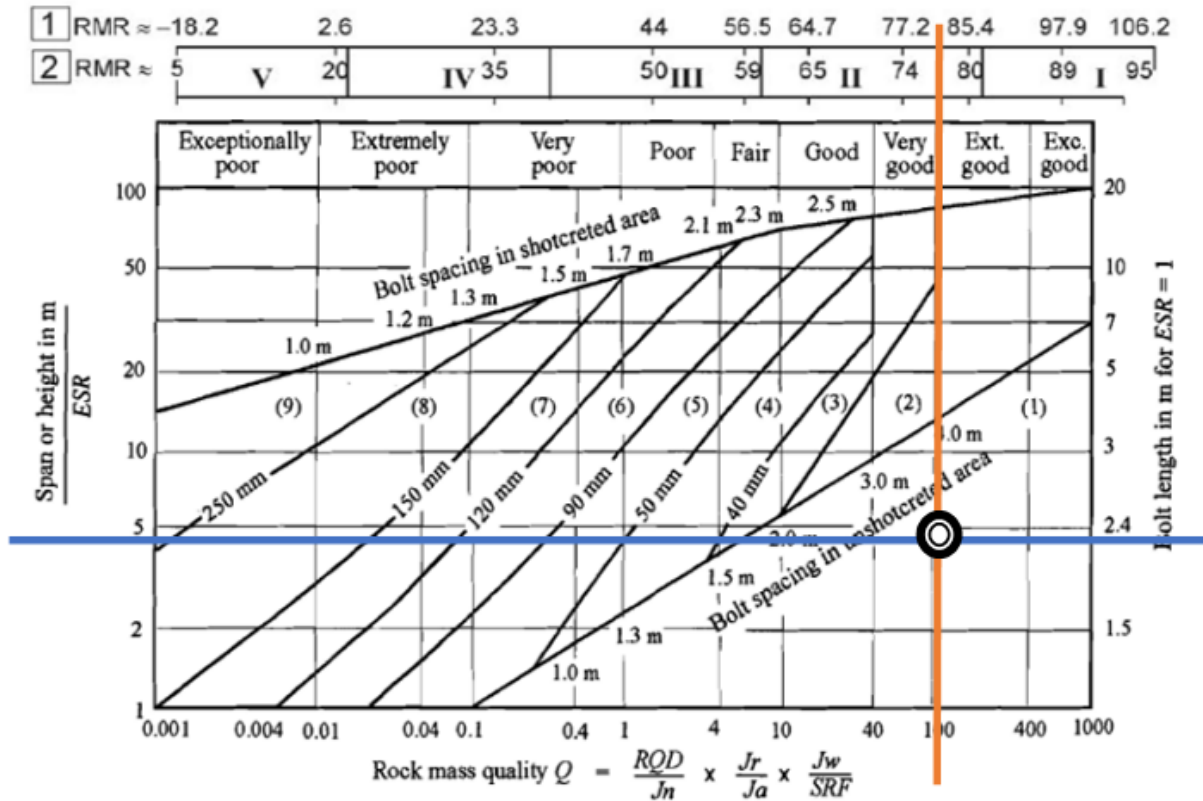
Debido a que lo que se busca construir es un túnel de carretera el valor del ESR oscila entre 1 y 1.3, para este ejemplo se tomara el valor de 1.3.

Es de tomar en consideración la altura del túnel para la determinación del sostenimiento, para este ejemplo se tomará una altura de 6 m.

Según el grafico, la altura se tiene que dividir entre el valor del ESR elegido:

$$\left(\frac{\text{Altura o longitud del tunel en metros}}{\text{ESR}} \right) = \left(\frac{6 \text{ m}}{1.3} \right) = 4.61 \text{ m}$$

Tomando en cuenta el resultado de cociente se procede a utilizar el grafico 1, se pueden utilizar tanto el valor de Q obtenido mediante la ecuación de Barton como el del RMR obtenido con la ecuación. En este caso se entrará al grafico utilizando el valor del RMR obtenido.



Entrando en el eje x superior con el valor del RMR de 77, se traza una línea vertical que interseca con la línea horizontal que proviene del eje y izquierdo, ese valor es el cociente de la altura del túnel entre el ESR que en este caso dio 4.61 m aproximadamente.

Se concluye que, mediante los datos obtenidos con anterioridad que denotan la calidad del macizo rocoso que compone el túnel, no será necesario aplicar ningún tipo de sostenimiento en este caso, eso incluye capas de concreto proyectado en todo el contorno del túnel.

04

CAPÍTULO 4

SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO

TIPOS DE
SOSTENIMIENTO

PG 39

TIPOS DE
REVESTIMIENTO

PG 44

TIPOS DE SOSTENIMIENTO

El sostenimiento se colocará de forma que deje deformarse al terreno, siempre dentro de la estabilidad del túnel, con el objeto de que la roca desarrolle su capacidad autoportante. La carga que va a soportar el sostenimiento dependerá pues del momento en que se coloque tras la excavación. En la etapa de Proyecto se diseñan varios tipos de sostenimiento a aplicar según sea la calidad y/o propiedades geomecánicas de la roca. Durante la obra, los sostenimientos se optimizan con la información que aporta la instrumentación del túnel. Inmediatamente tras la excavación se coloca un sostenimiento primario que estabiliza al túnel. Más adelante, en función de otros factores, tales como presencia de agua u otros factores funcionales, puede colocarse o no un revestimiento definitivo de concreto proyectado.

CONCRETO PROYECTADO

El concreto proyectado tiene dos efectos principales:

1. Sella la superficie de la roca, cerrando las juntas, evitando la descompresión y la alteración de la roca. De este modo el terreno puede mantener, en una mayor medida, sus características iniciales.
2. El anillo de concreto proyectado, desarrolla una resistencia y puede trabajar como lámina, resistiendo las cargas que le transmite la roca al deformarse. También resiste la carga puntual ejercida por pequeñas cuñas o bloques de roca, que descansan sobre la capa de concreto.



Existen dos sistemas de aplicación del concreto proyectado: por vía húmeda y por vía seca, los cuales se describen a continuación:

- **Sistema de proyección por vía seca:** permite alcanzar elevadas resistencias a edades tempranas en sellados y estabilización de terrenos.
- **Sistema de proyección por vía húmeda:** este sistema es el más adecuado cuando se trate de proyectos con altos volúmenes de concreto.

Las propiedades y características del concreto deberán seguir los lineamientos de las Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-RCDF).

En estas normas se menciona que el concreto de resistencia normal empleado para fines estructurales, de acuerdo con su función, puede ser de dos clases:

- **Clase 1**, con peso volumétrico en estado fresco comprendido entre los 21.6 kN/m³ (2.2 t/m³) y los 23.5 kN/m³ (2.4 t/m³), con una resistencia a la compresión, f'_c , de por lo menos 25.5 N/mm² (250 kg/cm²).
- **Clase 2**, con peso volumétrico en estado fresco comprendido entre 18.6 y 21.6 kN/m³ (1.9 y 2.2 t/m³), con una resistencia a la compresión inferior a $f'_c = 25.5$ N/mm² (250 kg/cm²) pero no menor de $f'_c = 20.4$ N/mm² (200 kg/cm²).

A continuación se presenta una tabla en la que algunos fabricantes sugieren distintas relaciones cemento/agregado para algunas resistencias mínimas a la compresión. En cualquier caso, deberán hacerse estudios del porcentaje de rebote en las condiciones de la obra teniendo en cuenta los materiales empleados en el diseño.

Mezcla en volumen	Mezcla en peso	Mezcla in situ en peso	R.C.S. (28 días)	Uso
1:5,5	1:5	1:3,6	230 kg/cm ²	Exterior
1:5	1:4,5	1:3,5	240 kg/cm ²	
1:4,5	1:4	1:3,2	250 kg/cm ²	Universal
1:4	1:3,5	1:3,2	300 kg/cm ²	
1:3,4	1:2	1:2	360 kg/cm ²	
1:2,2	1:1,2	1:1,2	400 kg/cm ²	

Tabla 4 - Dosificaciones típicas para el concreto lanzado

PERNOS DE ANCLAJE

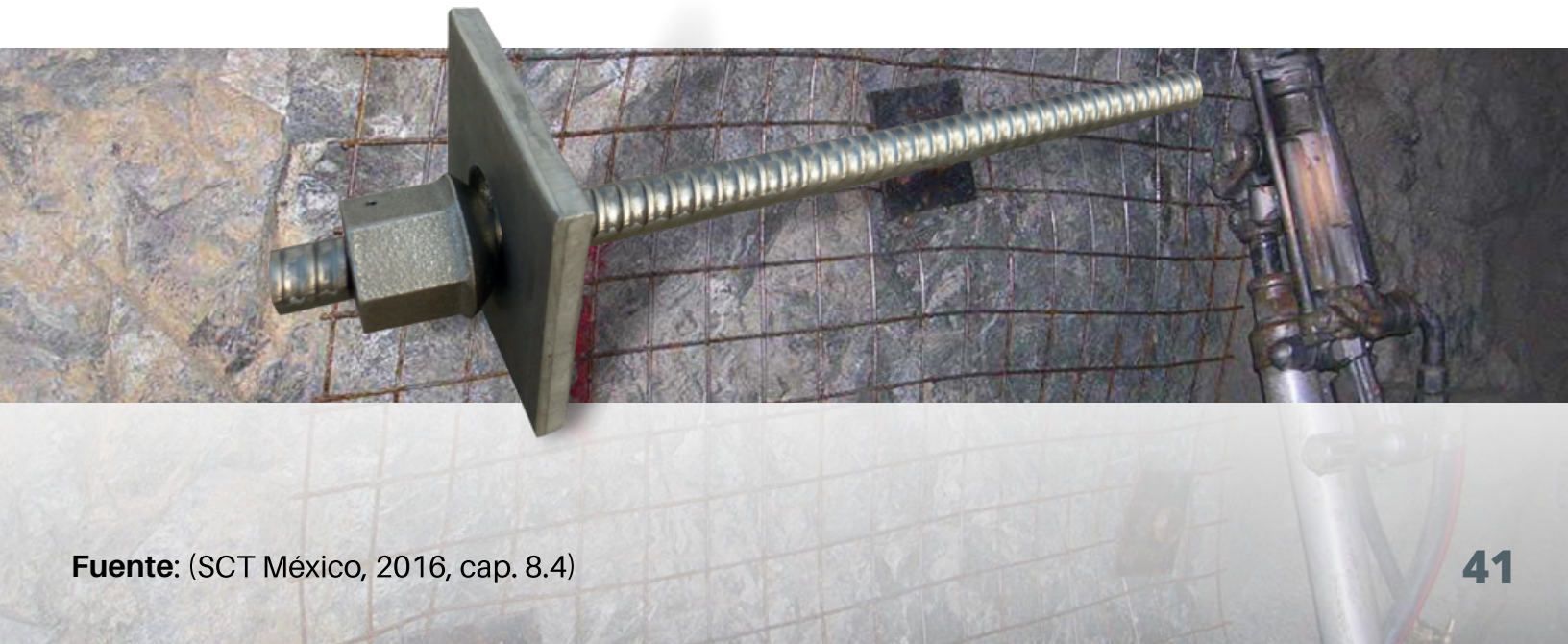
Los pernos de anclaje tienen igualmente dos efectos básicos sobre la roca:

1. Los pernos de anclaje cosen las juntas de la roca, impidiendo que cuñas y bloques puedan deslizar a favor de las fracturas. Generalmente la rotura de un macizo rocoso se produce siempre a favor de las juntas.
2. Por otra parte, los pernos de anclaje tienen un efecto de confinamiento de la roca, actuando del mismo modo que las armaduras lo hacen dentro del concreto. Gracias a este efecto se consigue absorber las tracciones que aparecen en el terreno, e impedir la formación de zonas descomprimidas.

Las características mecánicas de las barras de refuerzo de fibra de vidrio para los pernos de anclaje podrán apegarse a lo que se menciona en las normativas ASTM D 792 y ASTM D 3916. Según estas normativas, las propiedades mecánicas de este material deberán ser las que se muestran en la tabla 5.

Peso específico	1.9 gr/cm ³
Resistencia a la tensión	750-1000 MPa
Módulo de Elasticidad	40,000 MPa
Resistencia al corte.	>100 MPa
Alargamiento a la rotura	>3%
Contenido de vidrio	70%

Tabla 5 - Características mecánicas de barras de fibra de vidrio



CERCHAS

La cercha tiene una función resistente trabajando como un arco y colaborando con el concreto proyectado. Tiene la ventaja sobre éste que su resistencia inicial ya es la definitiva, mientras que en el concreto las resistencias se desarrollan con el tiempo. Otra función de las cerchas es definir claramente la geometría del túnel, lo que ayuda a conseguir los espesores adecuados de concreto proyectado y a evitar sobre excavaciones o zonas dentro de gálibo.



CONCRETO COLADO IN SITU

El concreto colado in situ suele ser utilizado como revestimiento definitivo en túneles y por lo general es colocado una vez que la excavación ha sido estabilizada por completo. Sin embargo, en ocasiones puede ser empleado como sostenimiento complementario al previamente ejecutado durante el proceso de excavación (marcos metálicos, concreto lanzado, anclas de fricción, etc.), especialmente en terrenos muy difíciles.

Estas estructuras pueden ser de concreto simple o reforzado con malla electrosoldada, varillas corrugadas o fibras metálicas. Para la construcción de este tipo de sostenimientos es imprescindible la utilización de cimbras metálicas o de madera, móviles o fijas.

El concreto colado in situ suele ser utilizado como revestimiento definitivo en túneles y por lo general es colocado una vez que la excavación ha sido estabilizada por completo. Sin embargo, en ocasiones puede ser empleado como sostenimiento complementario al previamente ejecutado durante el proceso de excavación (marcos metálicos, concreto lanzado, anclas de fricción, etc.), especialmente en terrenos muy difíciles.

Estas estructuras pueden ser de concreto simple o reforzado con malla electrosoldada, varillas corrugadas o fibras metálicas. Para la construcción de este tipo de sostenimientos es imprescindible la utilización de cimbras metálicas o de madera, móviles o fijas.

Según las NTC-RCDF, El concreto de resistencia normal empleado para fines estructurales puede ser de dos clases: clase 1, con peso volumétrico en estado fresco superior a 22 kN/m³ (2.2 t/m³) y clase 2 con peso volumétrico en estado fresco comprendido entre 19 y 22 kN/m³ (1.9 y 2.2 t/m³). En túneles se recomienda que el concreto sea de clase 1.

Las barras corrugadas que se utilicen como refuerzo deberán ajustarse a las normas NMX-C-407- ONNCCE, NMX-B-294 o NMX-B-457; asimismo, deberán cumplir con la norma ASTM-A-615. Se deberán tomar en cuenta las recomendaciones y limitaciones de uso de los aceros incluidos en las normas citadas.

	Grado 40 (280) ^A	Grado 60 (420)	Grado 75 (520) ^B
Resistencia de tensión mín. psi (MPa)	60 000 (420)	90 000 (620)	100 000 (690)
Fuerza de tensión mín. psi (MPa)	40 000 (280)	60 000 (420)	75 000 (520)
Alargamiento en 8 in. (203.2mm) mín. %			
Designación de No. de barra			
3 (10)	11	9	---
4, 5 (13, 16)	12	9	---
6 (19)	12	9	7
7, 8 (22, 25)	---	8	7
9, 10, 11 (29, 32, 36)	---	7	6
14, 18 (43, 57)	---	7	6

^A Grado 40 (280) Las barras están equipadas sólo en tamaños de 3 a 6 (10 a 19).

^B Grado 75 (520) Las barras están equipadas sólo en tamaños de 6 a 18 (19 a 57).

Tabla 6 - Propiedades y requerimientos de las barras corrugadas de acero

TIPOS DE REVESTIMIENTO

La estructura del revestimiento únicamente cumplirá con fines de acabado y funcionalidad. Sin embargo, ante ciertas condiciones geotécnicas, hay ocasiones en las que se asumen solicitaciones de carga. Los distintos tipos de acabados que pueden ser empleados en túneles carreteros:

CONCRETO COLADO REFORZADO CON VARILLAS

Esta estructura es el conjunto de elementos sólido-resistentes que, por sí solos, o acoplados con otros elementos, propician el equilibrio y la permanencia del revestimiento de un túnel, manteniéndolo en equilibrio, impidiendo movimientos indeseados y evitando deformaciones excesivas o permanentes.

Debido a la baja resistencia a la tensión y a la flexión del concreto se introduce el acero de refuerzo; otra cualidad del acero, la cual permite controlar las deformaciones debidas a la temperatura y a la contracción (en algunos casos, poco frecuentes en túneles) puede utilizarse para presforzar el concreto.

CONCRETO COLADO REFORZADO CON FIBRA

En este caso, el concreto se refuerza con la incorporación de fibras. Las fibras son elementos fabricados de distintos materiales como acero, polímeros u otros materiales, sintéticos o naturales. Se usan como refuerzo distribuido en todo el espesor del elemento y tienen la ventaja de que, una vez incorporados a la mezcla, estos se orientan en múltiples direcciones.

Las fibras actúan, de cierta manera, como la malla electrosoldada o las varillas de refuerzo, incrementando la tenacidad del concreto y agregando al material capacidad de carga posterior al agrietamiento.

CONCRETO LANZADO COMO REVESTIMIENTO DEFINITIVO

El concreto lanzado es utilizado actualmente en obras subterráneas como parte del sostenimiento, sin embargo, también puede ser empleado como revestimiento definitivo si se aplican capas adicionales a las del sostenimiento.

Es importante diferenciar entre un revestimiento constituido por una verdadera estructura, la cual se define geoméricamente en su intradós de manera exacta, formando superficies moldeadas y continuas, con espesores mínimos establecidos, controlados y verificados y un recubrimiento de concreto lanzado, el cual, aunque llegue a tener funciones estructurales (mediante un espesor considerable), siempre tendrá un acabado irregular y rugoso.

Un problema adicional que presentan los revestimientos de concreto lanzado es que el proceso de colocación se dificulta cuando este se realiza sobre la geomembrana de PVC (que forma parte del sistema de impermeabilización). Debido a que dicha geomembrana es de textura muy lisa, el concreto no se adhiere si se proyecta simplemente sobre ésta.

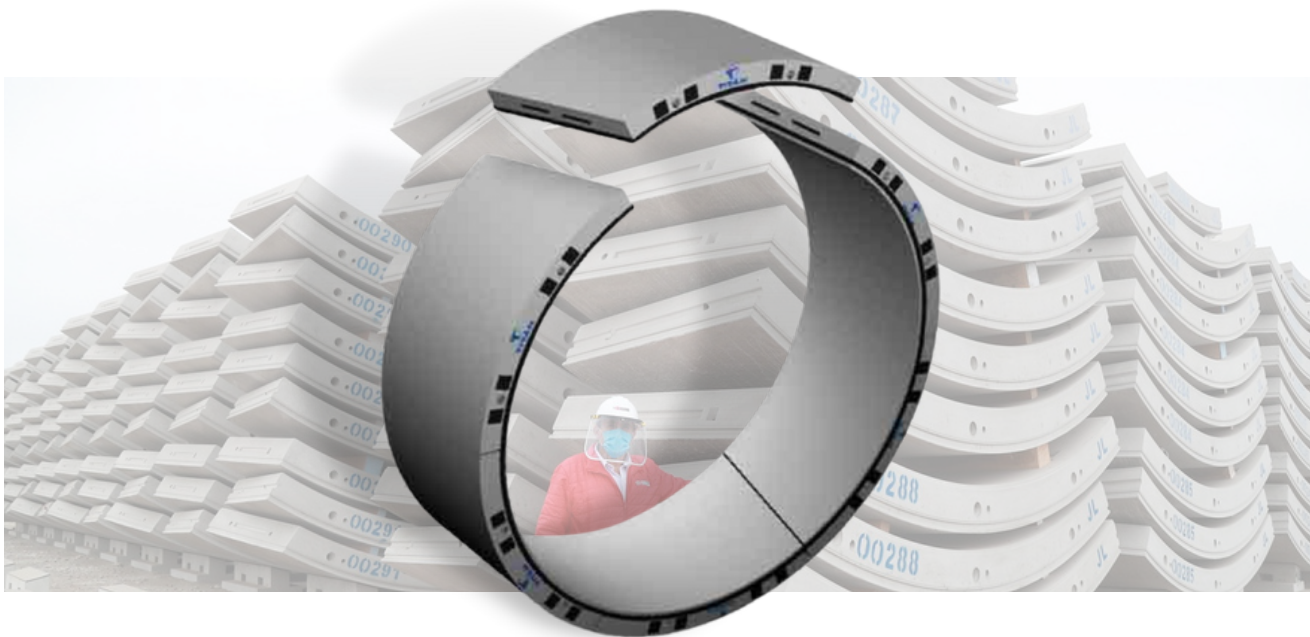


ELEMENTOS PREFABRICADOS (DOVELAS)

Las dovelas son elementos prefabricados de concreto reforzado. Las dovelas son elementos que en conjunto forman anillos, los anillos están conformados por el mismo número de piezas, generalmente entre cinco y ocho, más una dovela llave, cuña, o de cierre. Estos elementos se colocan simultáneamente durante el avance de la tuneladora, o en ciclos de excavación y paro para su colocación, permitiendo la estabilización total de la excavación durante toda la obra. Los anillos están dispuestos de manera yuxtapuesta y pueden ser rectos o troncocónicos.

El ancho de la dovela es variable, estando comprendida entre 1.0 y 1.70 m, el peso de cada dovela determinará la capacidad del elemento erector del escudo, con el que son colocadas durante la construcción del túnel.

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Por otra parte, las dovelas requieren además la presencia de una armadura interior con el objeto de soportar los esfuerzos debidos tanto a su manipulación como a las cargas del terreno



PANELES (NO ESTRUCTURALES)

Otro tipo de elementos que actualmente pueden ser empleados para dar el acabado final, pero sin ningún fin estructural, son los llamados paneles. Su principal objetivo es dotar de estética, proyección eficiente de la iluminación y mejorar en la ventilación dentro del túnel.

Los paneles proporcionan una superficie uniforme que mejora el aspecto interior del túnel permitiendo un mantenimiento sencillo; dan un acabado agradable y conforme con las necesidades requeridas de funcionalidad. Se fabrican con materiales como el aluminio, que además de ser ligero, puede tener un tratamiento superficial con resina de poliéster o estar vitrificado. También existen los paneles de concreto armado de alta resistencia o de fibra de cemento recubierto con porcelana de acero esmaltado y los formados por GRC (Conglomerado Reforzado de Fibras de Vidrio).



Con la colocación de paneles también se dispone de una superficie uniforme y resistente para el fácil anclaje de distintos elementos de señalización u otras instalaciones.

En la tabla 7 se tienen ejemplos de algunos tipos de materiales empleados en la fabricación de paneles.

Tipo	Características
Acero inoxidable	<p>El acero inoxidable gracias a sus propiedades mecánicas, permite la reducción del espesor de la estructura.</p> <p>Resistencia a la abrasión por roce.</p> <p>Limpieza con agua a presión, detergente y con apoyo de un rodillo de nylon.</p> <p>Elevada reflexión de la luz (Ahorro energético) sin producir deslumbramiento.</p> <p>Excelentes propiedades mecánicas, que permiten aligerar las estructuras.</p> <p>Buen comportamiento en caso de incendio: Decaída progresiva y lenta de las propiedades mecánicas de los paneles, utilización de lacados que no propagan las llamas y presentan una baja emisión de humos.</p> <p>Facilidad en las operaciones de limpieza, ya sea automatizadas para la limpieza periódica de las partículas contaminantes que provienen de los tubos de escape de los vehículos o aquellas especiales para la limpieza de graffitis.</p> <p>Ausencia de pigmentos tóxicos y aleaciones peligrosas, el panel es reciclable al 100%.</p> <p>El panel asegura un buen nivel de luminosidad sin producir deslumbramientos, contribuyendo de esta forma al ahorro energético como a la seguridad del tramo.</p>
Acero vitrificado	Resistencia a la abrasión, resistencia al choque, dureza de la superficie, resistencia al rayado, resistencia a los ácidos, resistencia a los graffitis.
Aluminio liso	El revestimiento en aluminio liso cumple con requisitos de reflectancia, durabilidad, mantenimiento, es estético y reciclable.
Aluminio grecado ondulado	El revestimiento de panel grecado/ondulado cumple con requisitos de reflectancia, durabilidad, mantenimiento estético, es reciclable, y proporciona impermeabilización.
Pintura Especial para Tuneles	En los casos de tuneles cuyo interior sea concreto aplicado con cimbra deslizante o con dovelas de concreto reforzado, también es posible recubrir los hastiales con productos como pinturas.

Tabla 7 - Tipos de materiales para la fabricación de paneles

05

CAPÍTULO 5

DISEÑO GEOMÉTRICO

TRAZADO EN PLANTA PG 50

TRAZADO EN PERFIL PG 55

**SECCIÓN
TRANSVERSAL** PG 57

EJEMPLO DE DISEÑO PG 61

05

TRAZADO EN PLANTA

El diseño del trazo en planta de un túnel está sujeto a las mismas limitaciones y recomendaciones del diseño geométrico de la carretera, excepto algunas particularidades específicas propias del túnel. El trazo no puede variarse de forma sustancial de la carretera.

La velocidad de diseño de los vehículos dentro del túnel determinará el diseño geométrico del trazo correspondiente. La velocidad máxima de operación dentro del túnel será la que corresponde a la velocidad de diseño de la carretera reducida en no menos del 20 % o reducido en 20 km/h por tramos consecutivos.

Deberán tenerse en cuenta los factores geológico-geotécnicos existentes y se procurará evitar los puntos o zonas conflictivas: fallas geológicas, zonas alteradas y otros. Para el diseño en planta, a continuación, se establecen los siguientes criterios:



A. PORTALES

Se recomienda que el trazo de la aproximación al túnel sea tal que el portal de éste sea visible por el conductor como mínimo 15 segundos antes de llegar a él en cualquier circunstancia. Es decir, si V es la velocidad de proyecto de la carretera en km/h, el portal debe ser visible desde una distancia mínima dada por la expresión:



$$L = 4.17 * V$$

Ecuación 2 - Longitud de visibilidad

B. ENLACES PROXIMOS AL TUNEL

Es recomendable no realizar ningún tipo de conexión, intersección o rotonda en la calzada, ni modificación del número de carriles en los 300 metros, anteriores o posteriores, del inicio o final del túnel.



C. ENLACES DENTRO DEL TÚNEL

Se evitará los enlaces, en las entradas, salidas y dentro del túnel. Si son inevitables (por ejemplo, en tramos urbanos) se reforzará la iluminación en dichas zonas. Las bifurcaciones se señalarán antes del inicio para que cada vehículo ingrese a este por el carril correspondiente a la salida que vaya a tomar y, de este modo, evitar, en lo posible, los cambios de carril dentro del túnel. En las incorporaciones se aumentará el número de carriles posterior al enlace, de forma que los vehículos que entran no tengan que incorporarse a carriles ocupados por otros vehículos.



D. VISIBILIDAD EN LAS CURVAS

Dentro del túnel se debe mantener una distancia de visibilidad mínima superior a la distancia de parada en caso de una incidencia. El Centro de Estudios de Túneles de Francia (CETU) ha elaborado un modelo que relaciona la velocidad de proyecto, la pendiente del trazo y el radio de curvatura mínimo admisible. La expresión correspondiente es:



$$R = (D * V^2) / (8 * e)$$

Ecuación 3 - Radio de visibilidad

ALINEAMIENTO HORIZONTAL

El manual brinda sus propias recomendaciones en cuanto a los radios mínimos y los peraltes a aplicar en base a la velocidad de diseño en la sección de alineamiento horizontal que corresponde al “diseño geométrico en planta”, estos parámetros se pueden apreciar a continuación:

		RADIO MÍNIMO (m)							
Velocidad (km/h)		30	40	50	60	70	80	90	100
Fricción Lateral		0.18	0.17	0.16	0.15	0.15	0.14	13	0.13
<u>Peralte</u>									
2.00%		35	66	109	166.66	226.84	314.8	425	524.67
3.00%		34	63	104	157.4	214.24	296.28	398.4	491.88
4.00%		32	60	98	149.12	202.96	279.82	375	462.94
5.00%		31	57	94	141.66	192.82	265.09	354.2	437.22
6.00%		30	55	89	134.91	183.63	251.84	335.5	414.21
7.00%		28	52	86	128.78	175.29	239.85	318.7	393.5
8.00%		27	50	82	123.18	167.67	228.95	303.6	374.76
9.00%		26	48	79	118.05	160.68	218.99	289.8	357.73
10.00%		25	47	76	113.33	154.25	209.87	277.2	342.17

Tabla 3-I-6 Radios mínimos absolutos

PERALTE MÁXIMO	0.04	0.06	0.08	0.1
<u>VELOCIDAD DIRECTRIZ km/h</u>	<u>RADIOS</u>			
30	400	500	500	500
40	700	800	800	800
50	1000	1000	1200	1200
60	1300	1400	1500	1500
70	2000	2000	2000	2000
80	2500	2500	2500	2500
90	3000	3000	3000	3000
100	5000	5000	5000	5000

Tabla 8 - Radios mínimos según velocidad de diseño y peralte

Con los radios mínimos determinados precedentemente y para vehículos marchando a la velocidad directriz, la fricción que se utiliza, corresponde a los valores máximos adoptados.

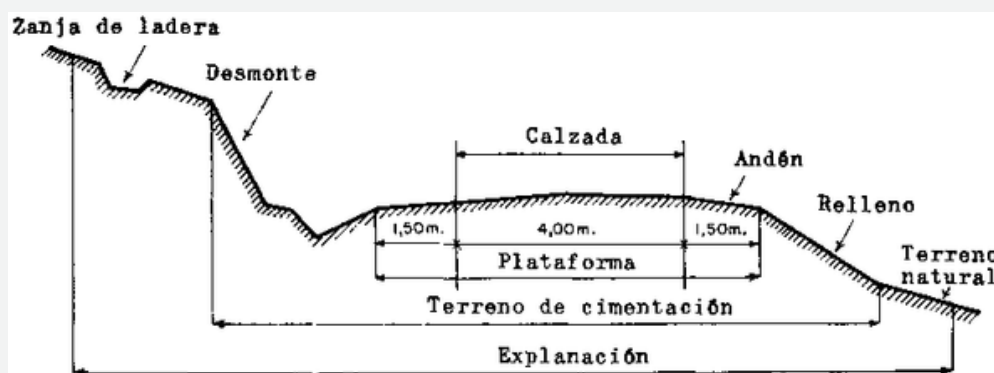
Radios deseables son aquellos que cumplen simultáneamente las condiciones de los siguientes criterios:

- La fricción utilizada para vehículos marchando a la velocidad directriz, corresponda a coeficientes menores que la mitad de los máximos.
- Durante la noche permitan iluminar suficientemente a los objetos colocados en el camino, a una distancia igual a la de frenado.

A continuación, se indica el ancho de calzada para dos carriles en función de la velocidad, aunque hoy en día estos anchos se consideran estándar para los tipos de carretera, esto independientemente de la velocidad directriz, por lo que pueden variar según la necesidad.

Velocidad	Ancho de Calzada			
	Carretera Especial	Carretera Principal	Carretera Secundaria	Camino Vecinal
entre 60 y 80	7.30 m			
entre 50 y 80		7.30 m		
entre 40 y 60			6.50 m	
entre 30 y 50				5.50 m

Tabla 9 - Ancho de la calzada según el tipo de carretera



TRAZADO EN PERFIL

En el perfil longitudinal se consideran prioritarias las características funcionales de seguridad y comodidad que se deriven de la visibilidad disponible, que genere una deseable ausencia de pérdidas de trazo y de una variación continua y gradual.

Una primera condición para el trazo en perfil de un túnel es el drenaje de las aguas que afloran al mismo procedentes del terreno. Asimismo, deben evitarse los diseños cóncavos que produzcan puntos bajos, pues se necesitaría en ellos disponer un bombeo para impedir la acumulación de agua. La emisión de gases contaminantes de los vehículos aumenta con la inclinación de la rampa y se hace excesiva a partir de un 2% de pendiente.

La velocidad de los vehículos pesados se reduce excesivamente en rampas superiores a esos valores, lo que obligaría a diseñar carriles adicionales para vehículos lentos. La experiencia demuestra que cuanto mayor es la rampa, mayor es la probabilidad de que se produzca una avería de un vehículo, que quedaría inmovilizado, provocando reducción de la capacidad y riesgo de colisión. Las pendientes descendentes son, por el contrario, beneficiosas por las razones contrarias a las anteriores, aunque en caso de incendio son perjudiciales por el efecto chimenea.

ALINEAMIENTO VERTICAL

La topografía del terreno influye en el alineamiento horizontal de alguna manera secundaria, sin embargo, en el alineamiento vertical la conformación del terreno es un factor importante que interviene en la definición de la rasante y los demás componentes del túnel.

A. PENDIENTES MÁXIMAS

No es práctico limitar o fijar las pendientes máximas de las rasantes, ya que las condiciones topográficas son las que, en la mayoría de los casos, definen la pendiente máxima; sin embargo, es conveniente dar una guía que sugiera las pendientes máximas de diseño. Para una velocidad directriz de 100 km/h, que corresponde a una carretera especial en terreno llano, la máxima pendiente debería ser del 5%.

Para velocidades de diseño de 80 km/h, que corresponde a una carretera especial en terreno ondulado y a una carretera principal en terreno llano, la pendiente máxima de la rasante debería estar entre el 5% al 7%. Para una velocidad directriz de 50 km/h que corresponde a una carretera principal en terreno montañoso, una carretera secundaria en terreno ondulado y un camino vecinal en zona llana, la pendiente máxima debería fluctuar entre el 7% y 12%.

B. CURVAS VERTICALES

Las curvas verticales deben ofrecer seguridad por medio de una adecuada visibilidad, deben ofrecer confortabilidad para los conductores y pasajeros de los vehículos, deben tener un buen sistema de drenaje y estéticamente deben ser presentables.

A continuación, se muestran los factores de K recomendables en base a la velocidad de diseño, con este factor de K se puede calcular la longitud mínima correcta que debe de tener la curva vertical si en algún caso es convexa:

Velocidad directriz km/h	Factor K calculado		Factor K redondeado	
			Mínimo absoluto	Mínimo recomendable
30	2.183	2.183	2	2
40	4.880	4.880	5	5
50	8.155	9.762	8	10
60	13.665	17.716	14	18
70	21.964	30.388	22	30
80	31.551	48.238	32	48
90	42.673	70.528	43	71
100	61.080	104.225	61	104

Tabla 10 - Factor K para curvas verticales convexas

Cabe recalcar que, con respecto a las curvas verticales cóncavas, los factores de K difieren inconmensurablemente cuando la velocidad de diseño adoptada es mayor, lo que la diferencia mucho de los valores expuestos para las curvas verticales convexas; con los mismos factores de K se puede determinar la longitud mínima de la curva siendo esta cóncava:

Velocidad directriz km/h	Factor K calculado		Factor K redondeado	
			Mínimo absoluto	Mínimo recomendable
30	3.944	3.944	4	4
40	7.170	7.170	7	7
50	10.286	11.628	10	12
60	14.554	17.236	15	17
70	19.774	24.229	20	24
80	24.797	32.095	25	32
90	29.814	40.182	30	40
100	36.931	50.358	37	50

Tabla 3-I-20 Valores del factor K para curvas cóncavas

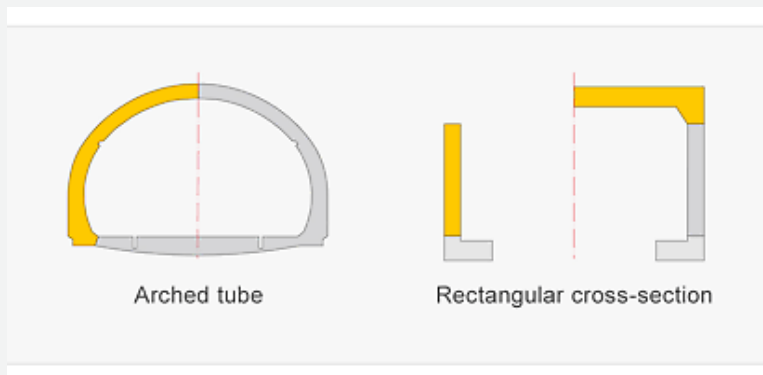
Tabla 11 - Factor K para curvas verticales concavas

SECCIÓN TRANSVERSAL

La configuración geométrica de la sección transversal del túnel debe satisfacer los carriles de tráfico, aceras o paseos de seguridad, espacios adecuados para ventilación, luces, sistema de control de tráfico, sistemas de seguridad contra incendios, entre otros. La sección transversal también viene determinada por el método de construcción del túnel.

Los túneles *cut and cover* tienen como resultado una configuración rectangular. Los sistemas estructurales también variarán según la sección. Para las secciones rectangulares, los diversos sistemas se pueden colocar sobre la cabeza, invertidos o adyacentes a los carriles de tráfico si el espacio elevado es limitado. Es esencial en las primeras etapas de diseño considerar la configuración geométrica de la sección transversal del túnel para permitir una fácil inspección y mantenimiento no solo de equipos mecánicos y eléctricos, sino también de la misma estructura del túnel.

En el dimensionamiento de la sección transversal de un túnel entran en juego diversos factores: ancho necesario para la circulación del tráfico, gálibo necesario para la circulación de los vehículos, ancho de las veredas, bermas, necesidades geométricas de las instalaciones como pase de ductos, sistemas de drenaje, entre otros equipamientos del túnel y, por último, la propia construcción del túnel.



A. CARRIL

Por cuestiones de seguridad, es recomendable que los túneles sean como mínimo de dos carriles, no obstante, en casos debidamente justificados, la autoridad competente podrá autorizar le ejecución de proyectos de túneles con un solo carril.

Cada carril debe tener un ancho de al menos 3.50 m, preferiblemente 4 o 5 m.



B. PENDIENTE TRANSVERSAL

Para que la pendiente transversal de la corona pueda evolucionar adecuadamente en las transiciones entre tangentes y curvas es necesario que la sección interior del túnel sea capaz de alojar en su totalidad a los gálibos sin importar la posición que adquieran.

Una primera condición para un buen alineamiento es el drenaje, por lo que debe asegurarse una pendiente transversal mínima del 2% para desalojar adecuadamente el agua que pueda recibir el túnel.

C. ACERA O VEREDA

Para el caso de túneles urbanos accesibles a los peatones, el ancho de la vereda será como mínimo de 1 m y puede estar aislada de la calzada con barreras rígidas, flexibles u otro medio. En el resto de los túneles la circulación de peatones se limita a los usuarios de vehículos averiados y a los empleados de mantenimiento.



D. GALIBO

El gálibo vertical es la altura mínima permitida para que los vehículos circulen de manera segura en el interior del túnel. El gálibo vertical por norma es de 5.5 m como mínimo.

El gálibo horizontal estará en función del ancho de la corona, siendo conveniente dejar un espacio de por lo menos 25 cm con respecto a las banquetas del túnel para minimizar el riesgo de choque de las ruedas con estas estructuras

E. BAHIA DE EMERGENCIA

En caso de ser necesario, se pueden incluir bahías de emergencia para albergar vehículos en caso de accidentes dentro del túnel, el ancho mínimo de dicha bahía deber ser de al menos 4 m.

Las bahías de emergencia se sugiere sean de una longitud efectiva de 50 m, y que estén espaciadas en distancias no mayores a 800 m por sentido de circulación; se diseñan alternadas para evitar construir una enfrente de otra.

Se deberán tomar en cuenta los siguientes criterios para asegurar la funcionalidad de las bahías así como su construcción:

- En el caso de túneles que requieran una sola bahía de emergencia, ésta se ubicará al centro del túnel; si el túnel es bidireccional, no se diseñaran dos bahías en el mismo cadenamiento ya que la sección de excavación sería demasiado grande.
- Las bahías de emergencia que se encuentren en diferentes sentidos de circulación, deberán tener una separación entre ellas de al menos 100 m.
- Las bahías podrán ubicarse en los lugares donde existan salidas de emergencia (galerías de conexión).



EJEMPLO DE DISEÑO

Para llevar a cabo el diseño geométrico del túnel carretero en su totalidad es necesaria la aplicación del software de diseño conocido como **AutoCAD Civil 3D** de Autodesk, este mismo es una solución de diseño y documentación para ingeniería civil que admite flujos de trabajo de BIM (Building Information Modeling).

ASPECTOS GENERALES

Para dar inicio al diseño geométrico es necesario contar con:

- El plano del levantamiento topográfico en archivo DWG
- La ubicación exacta del terreno con sus coordenadas en sistema UTM
- Información de cualquier vía o edificación existente en la zona

Algo que se recomienda mucho en el tema de túneles carreteros es que el terreno no cuente con pendientes muy empinadas para así no tener que sobrepasar las pendientes que especifica la normativa al momento del trazado en perfil.

Es necesario cargar el archivo DWG en el Civil 3D para comenzar a trazar alineamientos.

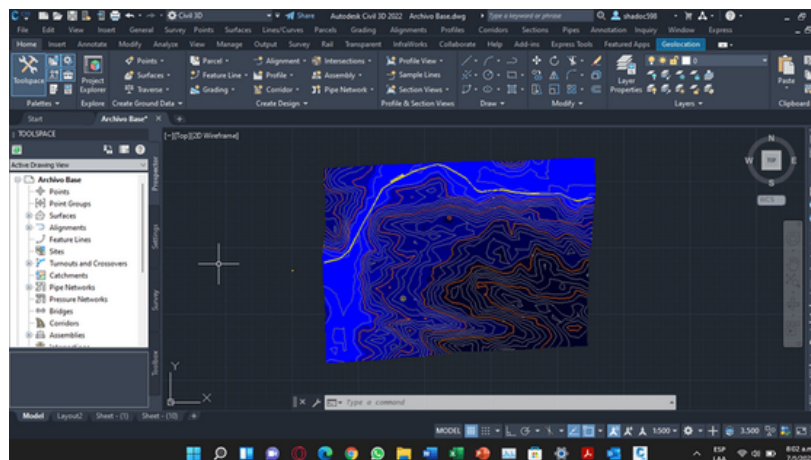


Ilustración 8 - Archivo del levantamiento topográfico cargado

TRAZADO EN PLANTA

Para comenzar el trazado en planta es necesario establecer los siguientes parámetros de diseño:

- Velocidad de diseño (km/h)
- Pendiente o Peralte (%)
- Radio mínimo (m)
- Longitud total del túnel carretero

Para este ejemplo se tomará en cuenta una velocidad de diseño de 60 km/h y un peralte de 6%, el valor del radio mínimo se especifica en la tabla 8 en el apartado de **Alineamiento Horizontal**.

Por este medio de la tabla se concluye que el radio mínimo es 134.91 metros. Para este ejemplo la longitud del túnel se estableció que sería como mínimo 500 metros.

A continuación, se traza el alineamiento usando el comando *Alignment* ubicado en la pestaña de *Home* en el Civil 3D. Se usa la primera opción denominada *Alignment Creation Tools*.

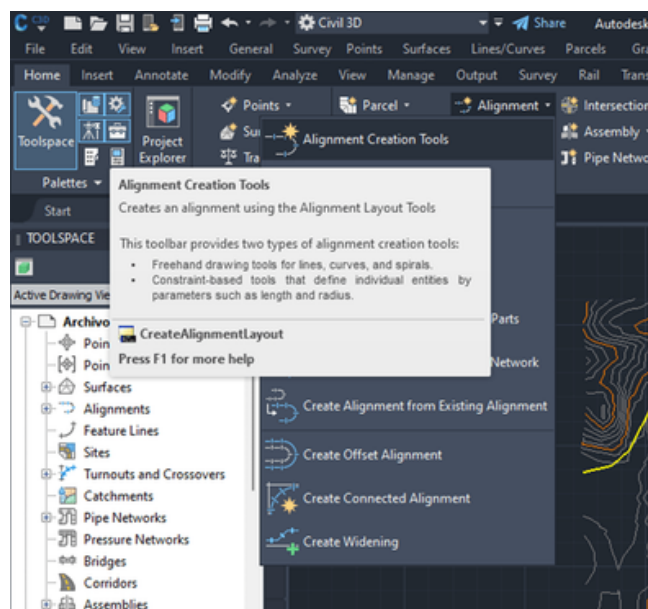


Ilustración 9 - Comando para trazar el alineamiento horizontal

Seguido de darle clic a la opción se presentará en un cuadro en el cual se le puede dar nombre al alineamiento, el nombre queda a criterio del diseñador, un nombre ideal es "eje central".

Se desplegará otro cuadro conteniendo el nombre del alineamiento y aquí es donde se comienza a trazar en el plano usando la primera opción que ofrece el cuadro, se trazan tangentes sin curvas o como el programa lo denomina *tangent-tangent (no curves)*.

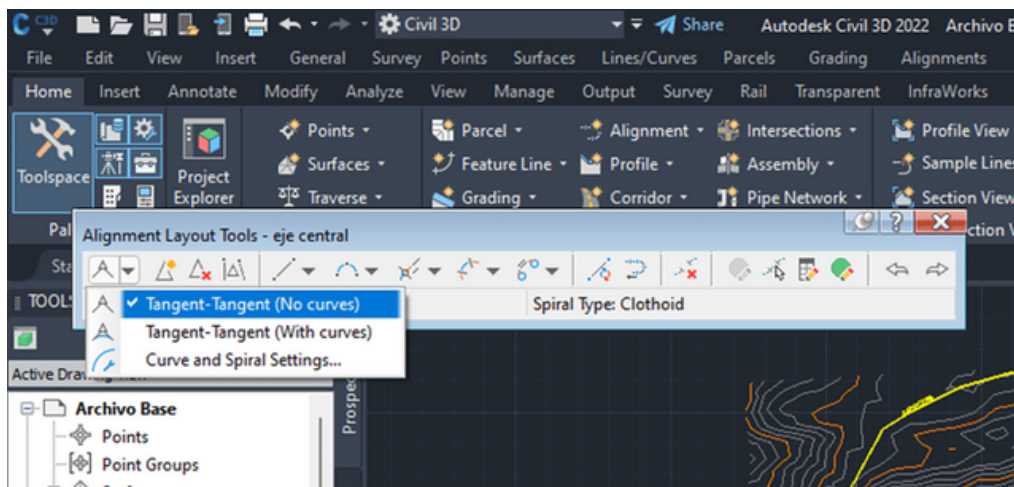


Ilustración 10 - Herramientas del alineamiento

Es importante nunca perder de vista este cuadro ya que varias de las opciones que presentan se utilizarán más adelante. Lo siguiente es trazar un alineamiento tentativo en el plano, pero se debe de tener cuidado en ir bajando de curva en curva de nivel siendo lo menos brusco posible.

La longitud del alineamiento que en este caso equivale a la longitud del túnel a diseñar se decidió que serían mínimo 500 metros.

Al trazar el alineamiento, creando un solo PI en todo el tramo, el resultado final puede ser el siguiente:

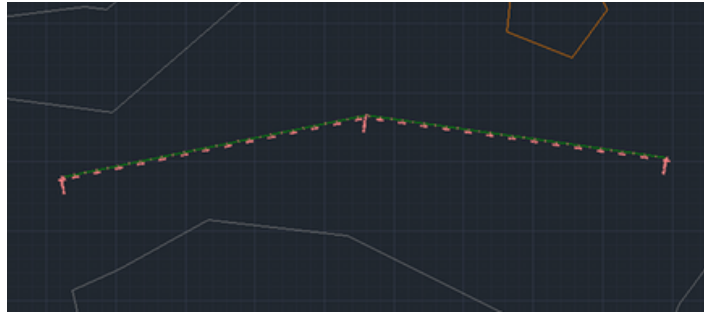


Ilustración 11 - Alineamiento horizontal plasmado en el plano

A continuación, se remonta nuevamente al cuadro que posee las herramientas para trazar el alineamiento con el fin de trazar las curvas, recordando que la velocidad de diseño elegida es de 60 km/h, con un peralte del 6%, el radio mínimo es de 134.91 metros respectivamente.

Es de notar que la **Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA)** especifica que la longitud de la curva a diseñar debe tener al menos 100 metros de longitud, es por esto que el radio puede aumentarse con el fin de cumplir con esta especificación.

Enseguida se va al cuadro y se elige la opción de curvas, específicamente la opción que dice *Free Curve Fillet (Between two entities, radius)*, se pedirá marcar la primera línea de alineamiento horizontal y luego la siguiente, estas líneas son divididas por un PI, seguido de eso el programa pedirá el radio con el cual se desea hacer la curva, en este caso el radio es 134.91 metros pero para cumplir con el dato de la SIECA el radio se aumenta a 252 metros para cumplir con la especificación anterior.

La curva horizontal final cuenta con los siguientes parámetros:

- Longitud= 114.089 m
- Deflexión (Δ)= 25.9398
- Radio= 252 m
- Grado de curvatura= 6.8209
- PC= 0+229.31
- PT= 0+343.40

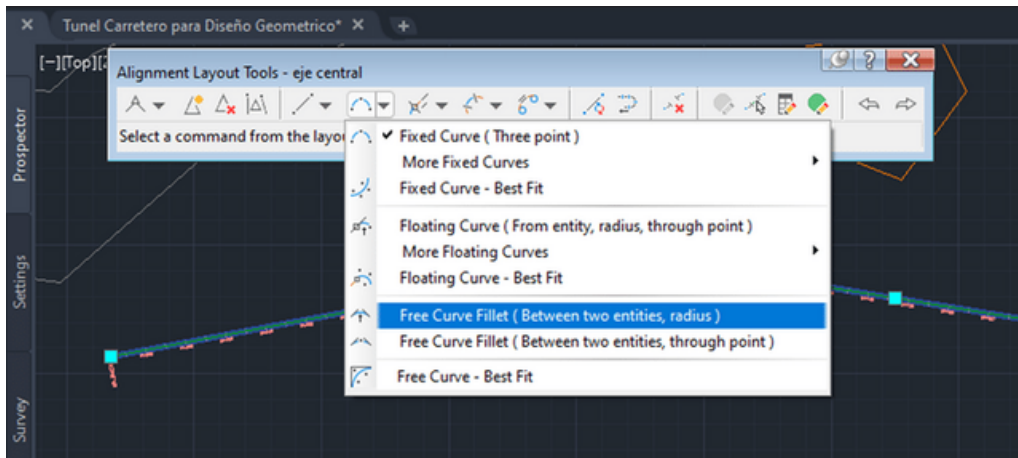


Ilustración 12 - Creacion de curvas horizontales con radio

Una vez insertado los valores el alineamiento cambia a ser curvo y no recto y además marca desde el PI la distancia hacia el PC y PT de la curva. Desde aquí se procede a hacer cambios en el mismo alineamiento de ser necesario, es posible alargarlo, reducirlo e inclusive crear nuevos PI para hacer más dinámico el túnel, pero por los momentos el alineamiento se mantendrá como esta actualmente.



Ilustración 13 - Alineamiento horizontal final

TRAZADO EN PERFIL

Se llegó a trazar un alineamiento con una longitud final de 556.18 metros respectivamente, eso incluyendo los cambios que se hicieron. Lo siguiente es crear una vista en perfil que toma el terreno en donde se dibujó el alineamiento, para esto se va al comando *Profile* en *Home* y se da a la primera opción denominada *Create Surface Profile*.

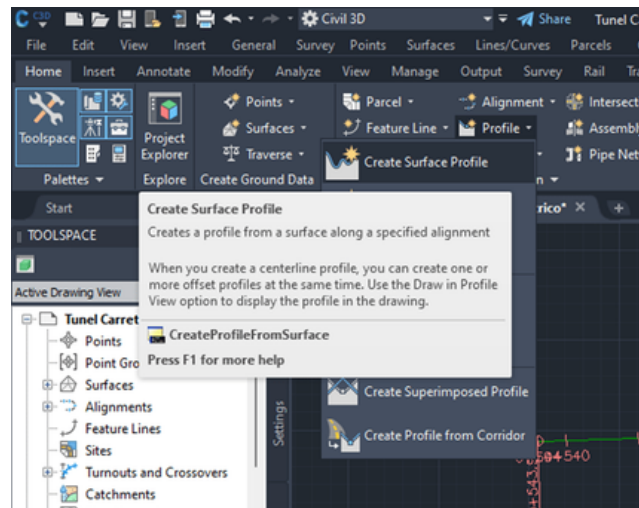


Ilustración 14 - Comando para crear perfiles longitudinales

Nuevamente se presentará un cuadro en el que se puede elegir el alineamiento sobre el cual basar el perfil longitudinal y la superficie del terreno. Es importante tener creada una superficie para el plano topográfico solo así el alineamiento y el perfil toman en cuenta las elevaciones o curvas de nivel que posee el terreno.

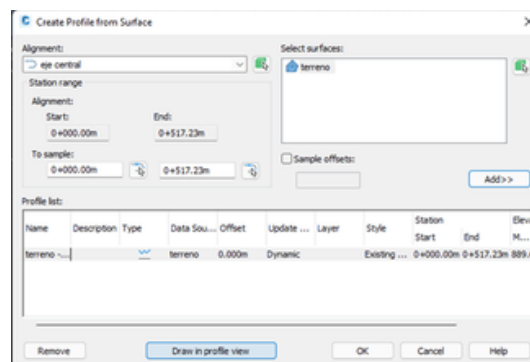


Ilustración 15 - Cuadro para la creación del perfil

Se procede a dar clic en la opción que dice *Draw in profile view*, el programa pedirá que se elija un punto en cualquier parte del dibujo para dibujar el perfil, la longitud del perfil dependerá de la longitud del alineamiento así que es importante elegir un lugar amplio dentro del dibujo en donde se pueda presentar el perfil longitudinal en toda su totalidad.

El resultado es el siguiente:

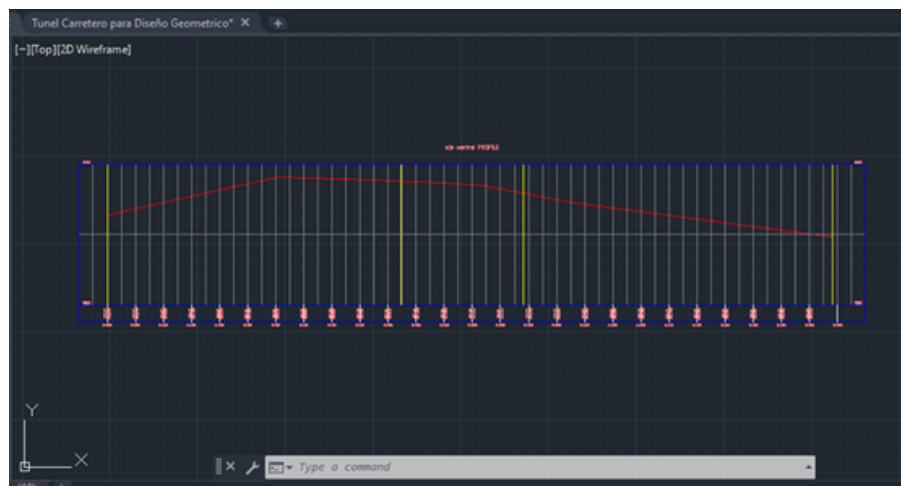


Ilustración 16 - Perfil longitudinal creado en base al alineamiento

Lo que sigue a continuación es trazar la rasante del túnel que hace referencia a la vía, tomando en consideración las pendientes máximas establecidas en el apartado de **Alineamiento Vertical** estas oscilan entre 5% a 7%, ya que anteriormente se estableció un peralte del 6% entonces esa es la pendiente máxima en este caso.

Tentativamente se traza la rasante en el terreno dejando un espacio de entre 5 a 6 metros (galibo) por debajo del terreno natural para incluir más adelante la bóveda del túnel. La rasante se traza con un comando ubicado nuevamente en la pestaña *Home* en la parte de *Profile* y el comando se llama *Profile Creation Tools*, esto libera un cuadro similar al del alineamiento horizontal, pero este trabaja únicamente con el perfil longitudinal.

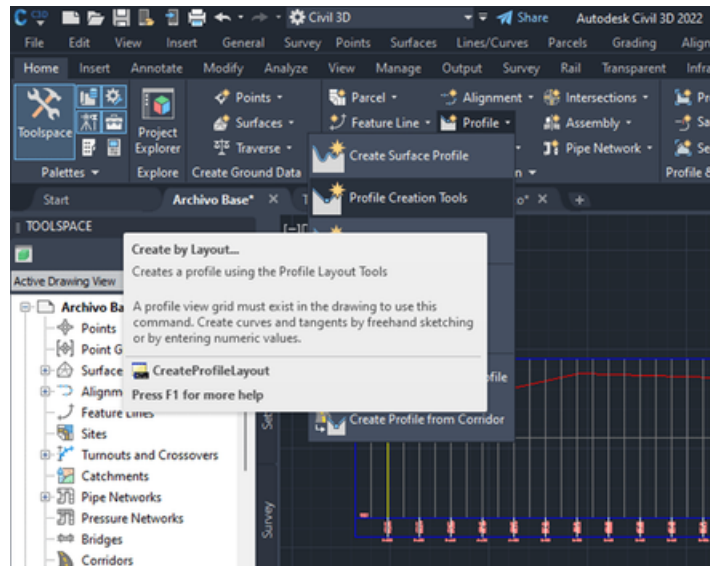


Ilustración 17 - Comando para abrir el cuadro de herramientas

El programa pide elegir el perfil al cual se le quiere dibujar la rasante, una vez elegido el perfil se despliega el cuadro para darle nombre al alineamiento vertical, el nombre más común para darle es el de "rasante" pero esto queda a criterio del diseñador. Se procede a trazar la rasante insertando cualquier PI que se considere adecuado.

Se usa el comando *Draw Tangents* para dibujar la rasante, esta es representada como una línea amarilla, el resultado es el siguiente:

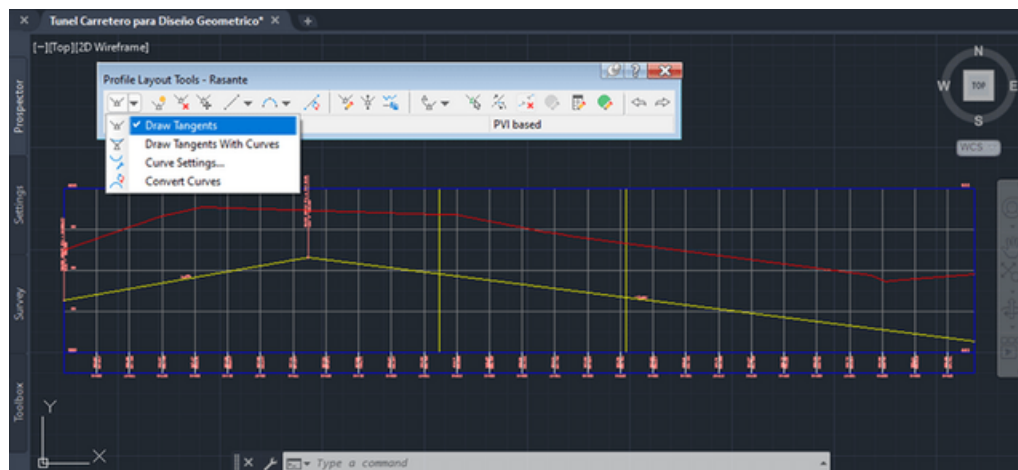


Ilustración 18 - Comando para trazar el alineamiento vertical

Es ahora donde se aplican los valores encontrados en la tabla # esto debido a que por la naturaleza del PI establecido anteriormente la curva vertical seria cóncava. Recordando que la velocidad de diseño estipulada fue de 60 km/h se toma entonces el factor K recomendable que en este caso es 18, el valor es adimensional.

Para crear curvas verticales se remite a la herramienta en la Ilustración #, en la sección de curvas se elige la opción de *Free Vertical Curve (Parabola)* y se aplica el mismo concepto, se eligen las dos líneas separadas por el PI y se inserta el valor K.

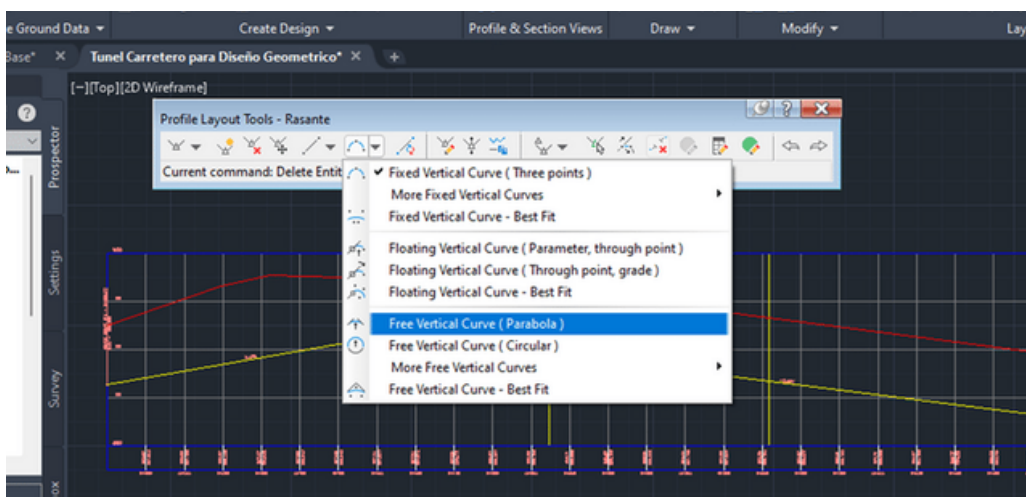


Ilustración 19 - Creación de curvas verticales tipo parabola

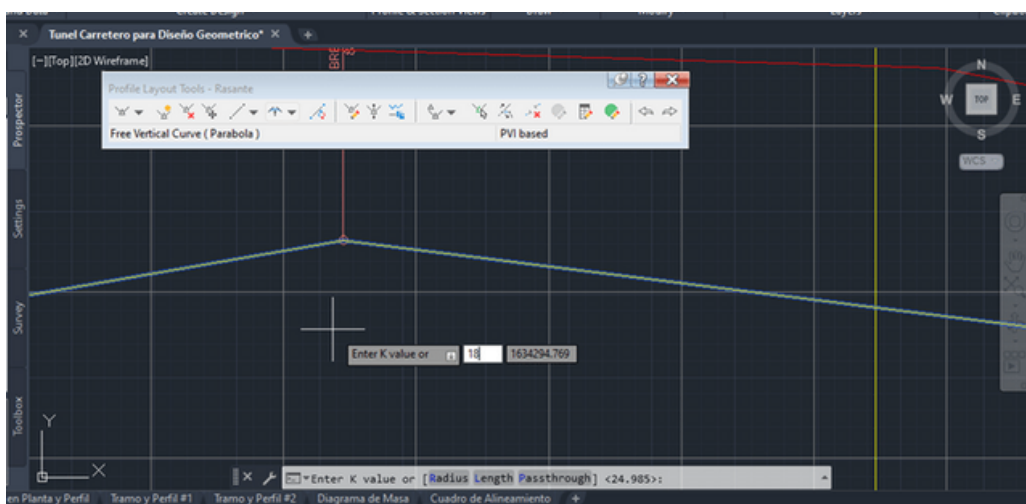


Ilustración 20 - Aplicación del factor K

Como resultado de la inclusión de estos parámetros la curva cambia de ser recta a ser parabólica, las pendientes se mantuvieron abajo del 6% y como resultado se obtuvo lo siguiente:

- Tramo antes de la parábola, pendiente = 3.48%
- Tramo después de la parábola, pendiente = -2.52%

El resultado final es el siguiente:

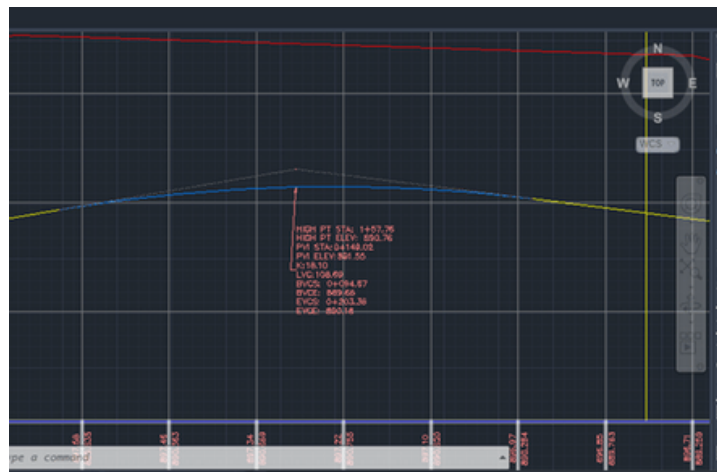


Ilustración 21 - Curva vertical cóncava creada

SECCION TRANSVERSAL

Lo siguiente por hacer es crear los Assembly, este comando sirve para crear la sección transversal de la vía, existen dos tipos de pavimentos que pueden aplicarse:

- Pavimento flexible (asfalto)
- Pavimento rígido (concreto)

Pero para determinar las dimensiones de cada uno de sus componentes es necesario conocer algunos parámetros como lo son:

- El Transito Promedio Diario (TPD) de la zona
- Dato del crecimiento poblacional
- El CBR de cada uno de los componentes de la vía
- Módulos de elasticidad de los principales materiales

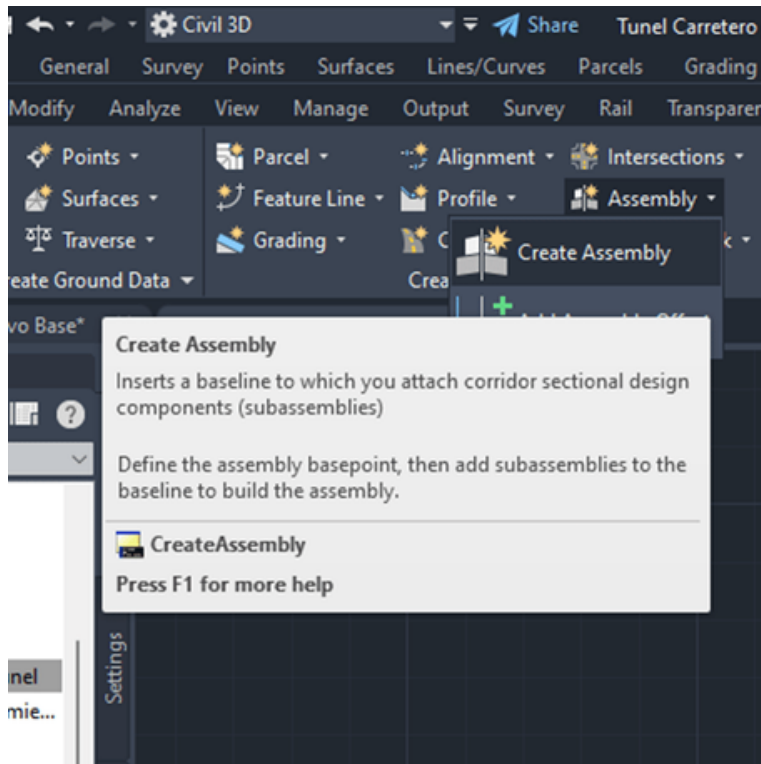


Ilustración 22 - Comando para crear el montaje de la vía

Entre otros parámetros que no se tienen a mano, es por eso que se decidió aplicar valores estándar para un pavimento flexible como lo pueden ser:

- Carpeta asfáltica = 6 cm
- Base = 15 cm
- Subbase = 30 cm

En paralelo con la vía también se definió el ancho de carril, los valores mínimos establecidos en el apartado de Sección Transversal fueron que el ancho de carril se recomienda que este entre 3.50 a 5 metros respectivamente, para este ejemplo se tomó el valor máximo que es 5 metros.

Se tomó en consideración un bombeo del 2% para contribuir en el drenaje transversal, también se incluyeron aceras de 1.30 x 0.60 tomando en cuenta que el ancho mínimo establecido es de 1 metro respectivamente. La altura del túnel (galibo) es de 6 metros según las normativas.

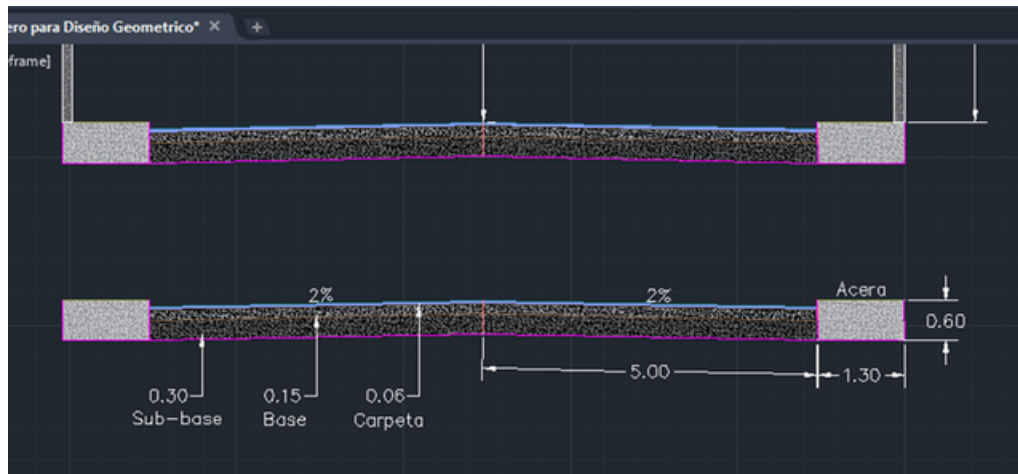


Ilustración 23 - Sección transversal de la vía

Como agregado al diseño del túnel se decidió implementar carriles o bahías de emergencia como medida de seguridad ante accidentes dentro del mismo túnel. La bahía se estableció que podía tener un ancho mínimo de 4 metros, se tomó ese valor para el diseño actual.

Como resultado se hicieron un total de tres secciones transversales o tres *Assembly*, una vía sin carril de emergencia, una con carril de emergencia en el lado derecho y otra con carril de emergencia en el lado izquierdo.

Las bahías están normadas para medir 50 metros longitudinalmente y estar separadas cada 100 metros si se encuentran en sentidos opuestos.

A estos montajes se les fue dado un nombre para su implementación en el *Corridor*, y van en este orden según como se mira en la Ilustración 24:

- Carretera del Túnel
- Carretera del Túnel con carril de emergencia derecho
- Carretera del Túnel con carril de emergencia izquierdo



Ilustración 24 - Montajes que componen el túnel

Una vez definidos los montajes o *Assemblies* es momento de crear el *Corridor* del túnel, este se verá reflejado tanto en el alineamiento horizontal como vertical dándole así forma al túnel carretero en ambos trazados.

Para llevar a cabo este proceso se va a la pestaña *Home* y debajo de la opción de *Profile* está la opción de *Corridor*, se da clic en el primer comando.

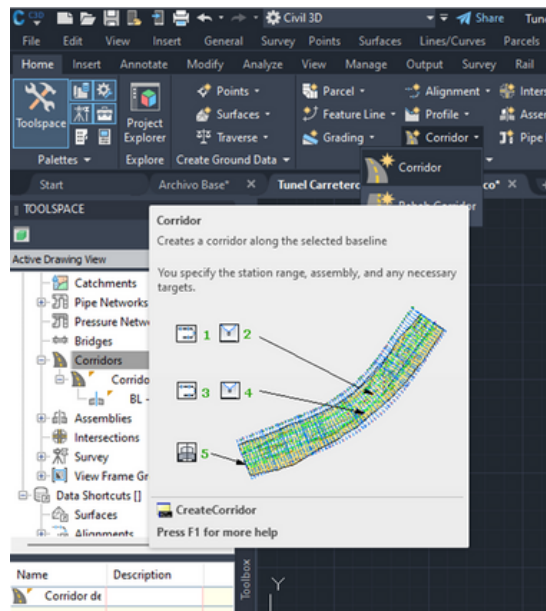


Ilustración 25 - Comando para crear el Corridor

Al *Corridor* nuevamente se le puede poner nombre, queda a criterio del diseñador, en las opciones del *Corridor* se especifica que se desea armar utilizando el "eje central" que es el nombre del alineamiento horizontal y la "rasante" que es el nombre del alineamiento horizontal.

Automáticamente el Civil 3D crea el *Corridor* en base al *Assembly* elegido, para comenzar se utilizó el *Assembly* del túnel carretero sin bahía.

Con el motivo de incluir las bahías de emergencia, se ha definido de que estación a que estación el túnel se mantiene de dos carriles solamente y cuando se incluyen las bahías, siempre respetando el espaciamiento entre ellas:

- De la 0+000 a la 0+100 = Carretera del Túnel
- De la 0+100 a la 0+150 = Carretera del Túnel con carril de emergencia derecho
- De la 0+150 a la 0+400 = Carretera del Túnel
- De la 0+400 a la 0+450 = Carretera del Túnel con carril de emergencia izquierdo
- De la 0+450 a la 0+556.18 = Carretera del Túnel

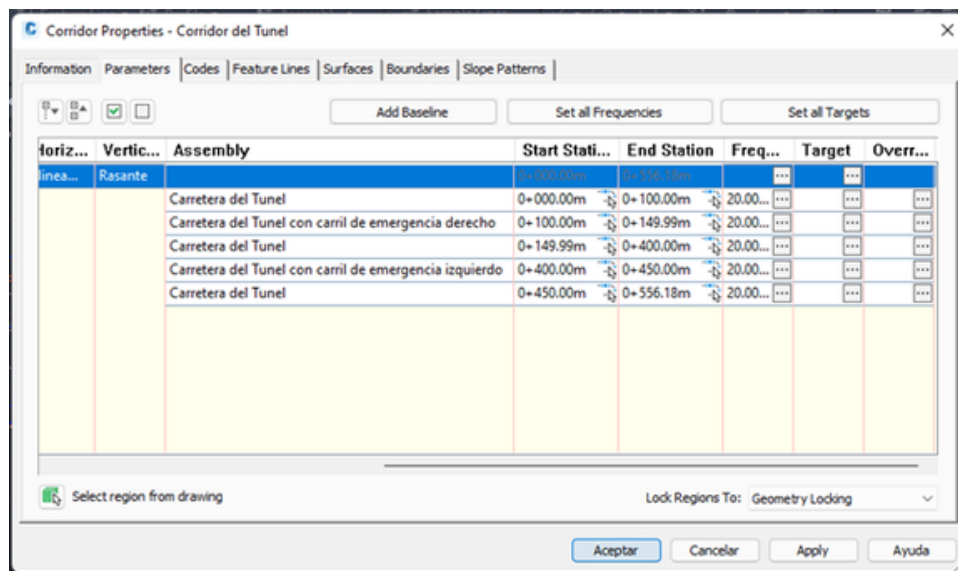


Ilustración 26 - Propiedades de los parámetros del Corridor

Una vez aplicado cada *Assembly* al *Corridor*, el alineamiento horizontal se vera de esta manera cuando se pretenda hacer una vista en planta:



Ilustración 27 - Corridor del túnel con bahías incluidas

Para darle volumen al túnel es necesario crearle una superficie al *Corridor*, esto más adelante ayuda a crear las tablas que demuestran los metros cúbicos de corte hechos a lo largo de todo el túnel, los 556 metros aproximados que se habían establecido anteriormente.

Desde las propiedades del *Corridor*, en la pestaña de *Surface*, se crean las superficies que compondrán la vía y transversalmente se vera la sección típica que se hizo con anterioridad.

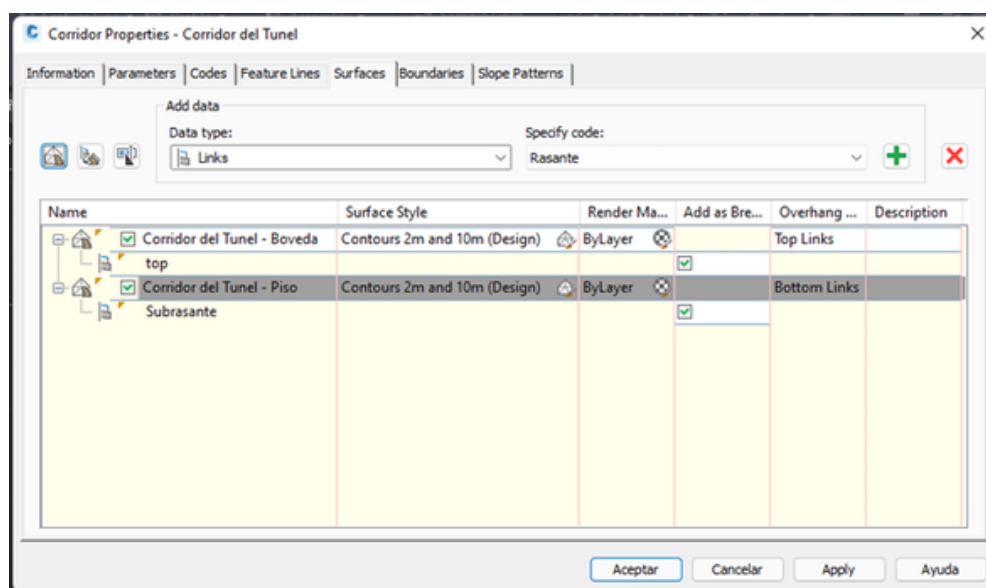


Ilustración 28 - Creación de las superficies del Corridor

Al activar el *Object Viewer* teniendo seleccionado el Corridor, el túnel se mira unido a la vía de esta manera:

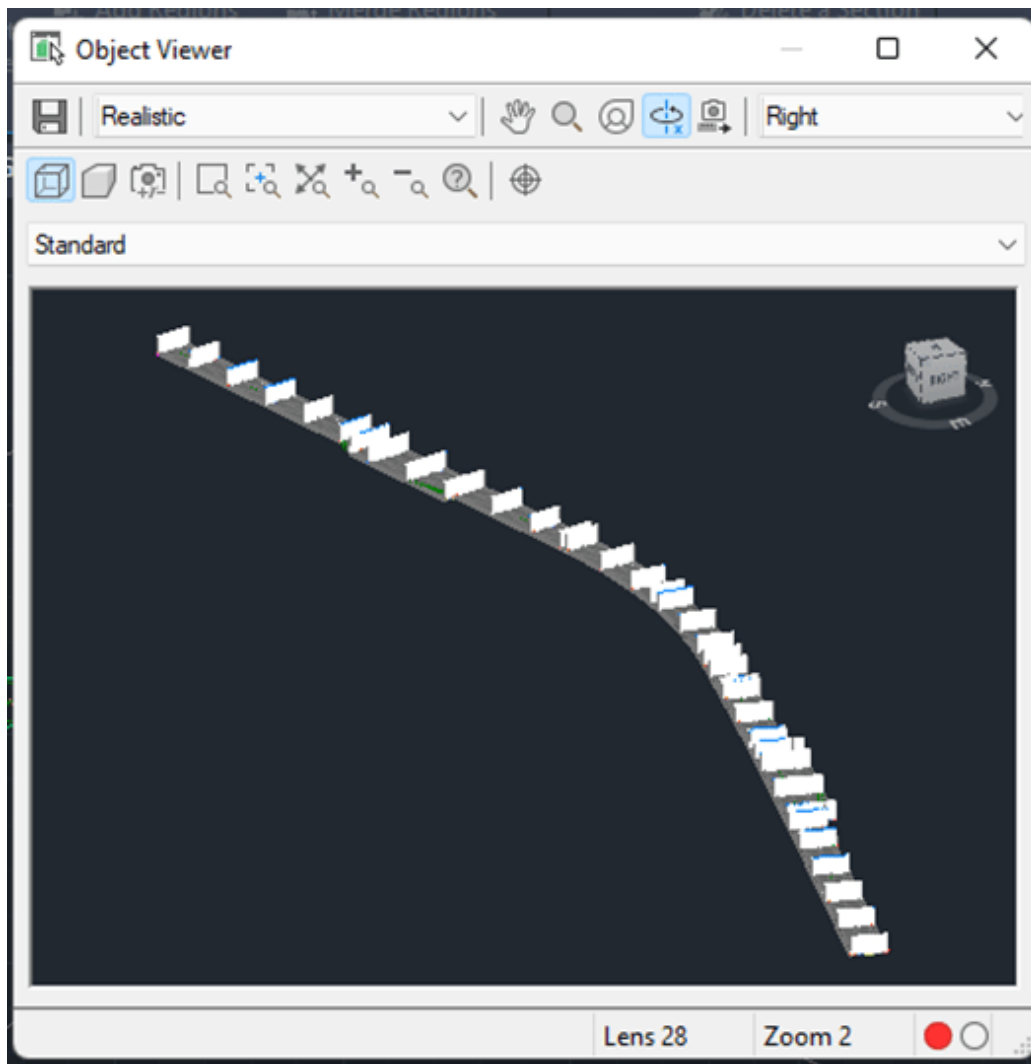


Ilustración 29 - Object Viewer del alineamiento horizontal

En el capítulo 11 del manual pueden verse los planos hechos en el mismo Civil 3D mostrando cada detalle anteriormente explicado y desarrollado.

Nota: los planos deben de presentarse, por ley, en hoja tamaño tabloide o doble carta.

06

CAPÍTULO 6

DISEÑO ESTRUCTURAL

CARGAS

PG 78

**COMBINACIONES DE
CARGA**

PG 81

EJEMPLO DE DISEÑO

PG 83

CARGAS

Se considerarán las siguientes cargas y fuerzas permanentes y transitorias:

CARGAS GENERALES

La especificación de la AASHTO LRFD divide las cargas en dos categorías: cargas permanentes y cargas transitorias. La AASHTO LRFD define las siguientes cargas permanentes que son aplicables al diseño de túneles de desmonte y revestimiento:

DC = Carga muerta: Esta carga comprende el peso propio de los componentes estructurales, así como las cargas asociadas a los accesorios no estructurales. Las fijaciones no estructurales pueden ser señales iluminación, señales, acabados arquitectónicos, impermeabilización, etc. Los pesos reales de otros elementos deben calcularse en función de su composición y configuración.

DW = Carga muerta: Esta carga comprende el peso propio de las superficies de desgaste y los servicios públicos. Las superficies de desgaste pueden ser de asfalto u hormigón. Las cargas muertas, las superficies de desgaste y los servicios públicos deben calcularse en función del tamaño y la configuración reales de estos elementos.

EH = Carga de presión horizontal de la tierra. La información necesaria para calcular esta carga se deriva de los datos geotécnicos desarrollados durante el programa de investigación del subsuelo. Las presiones en reposo deben utilizarse en el diseño de la estructura del túnel de desmonte y recubrimiento.

EL = Efectos acumulados de las fuerzas de bloqueo resultantes del proceso de construcción, incluidas las fuerzas secundarias del postensado si se utilizan.

ES = Carga de sobrecarga de tierra. Es la carga vertical de tierra debida al relleno sobre la estructura que se colocó por encima de la línea de tierra original. Se recomienda utilizar una carga de sobrecarga mínima de 400 psf en el diseño de los túneles cortados y cubiertos. Si existe la posibilidad de un desarrollo futuro sobre la estructura del túnel, el recargo del desarrollo real debe utilizarse en el diseño de la estructura. En lugar de una carga bien definida, se recomienda utilizar un valor mínimo de 1000 psf cuando se prevea un desarrollo futuro.

EV = Presión vertical de la carga muerta del relleno de tierra. Es la carga vertical de tierra debida al relleno sobre la estructura hasta la línea de tierra original. La información necesaria para calcular esta carga se deriva de los datos geotécnicos desarrollados durante el programa de investigación del subsuelo.

El LRFD define las siguientes cargas transitorias que son aplicables al diseño de estructuras de corte y recubrimiento:

CT = Fuerza de colisión de vehículos: Esta carga se aplicaría a los componentes individuales de la estructura del túnel que podrían resultar dañados por la colisión de vehículos. Normalmente, las paredes del túnel son muy macizas o están protegidos por barreras de desvío, por lo que esta carga sólo debe considerarse en circunstancias habituales. Es preferible detallar los componentes estructurales del túnel de modo que no estén sujetos a los daños causados por el impacto de los vehículos.

EQ = Sismo. Esta carga debe aplicarse al revestimiento del túnel de acuerdo con la zona sísmica para el túnel. El ámbito de este manual no incluye el cálculo ni el diseño de las cargas sísmicas. El diseñador debe ser consciente de que las cargas sísmicas deben tenerse en cuenta en el diseño del revestimiento del túnel de acuerdo con las especificaciones del LRFD.

IM = Carga dinámica del vehículo: Esta carga puede aplicarse a las losas de la calzada de los túneles y puede también aplicarse a la losa del techo de los túneles que se construyen bajo otras carreteras, líneas ferroviarias, pistas de aterrizaje u otras instalaciones que transporten vehículos en movimiento.

LL = Carga viva vehicular: Esta carga puede aplicarse a las losas de la calzada de los túneles y también puede aplicarse a la losa del techo de los túneles que se construyen bajo otras carreteras, líneas ferroviarias, pistas u otras instalaciones que transportan vehículos en movimiento. Esta carga se distribuiría a través del relleno de tierra antes de aplicarse al techo del túnel, a menos que el tráfico recaiga directamente sobre el techo del túnel.

WA = Carga de agua. Esta carga representa la presión hidrostática prevista fuera de la estructura del túnel. Las estructuras de los túneles se suelen detallar para que sean herméticas, sin que se prevea el alivio de la presión hidrostática. Como tal, el túnel está sujeto a la presión hidrostática horizontal en las paredes laterales, presión hidrostática vertical en el techo y una fuerza de flotación en el suelo. La presión hidrostática actúa de forma normal a la superficie del túnel. Hay que suponer que el agua desarrollará una presión hidrostática total en las paredes, el techo y el suelo del túnel. El diseño debe tener en cuenta la gravedad específica de las aguas subterráneas, que pueden ser salinas, cerca del agua salada.

Las cargas hidrostáticas, tanto máximas como mínimas, deberían utilizarse para los cálculos estructurales, según corresponda al elemento que se esté diseñando. A efectos de diseño, las presiones hidrostáticas que se suponen aplicadas a las estructuras subterráneas deben ignorar el alivio de la presión de los poros obtenido por cualquier infiltración en las estructuras, a menos que se instale y mantenga un sistema de alivio de presión adecuadamente diseñado.

COMBINACIONES DE CARGA

Las cargas descritas anteriormente deben ser factorizadas y combinadas de acuerdo con la especificación LRFD y aplicadas a la estructura. Las estructuras de corte y recubrimiento se consideran estructuras enterradas y, como tales, el diseño se rige por las especificaciones de la AASHTO LRFD. Se enumeran los estados límite y combinaciones de carga aplicables a las estructuras enterradas, como el **Estado Límite de Carga de Servicio (Service) Combinación I** y **Combinaciones I y II de Estados Límite de Resistencia (Strength)**. En algunos casos, la ausencia de carga viva puede crear un caso gobernante. Por ejemplo, la carga viva puede reducir los efectos de la flotabilidad.

La combinación de los requisitos, tal como se ha descrito anteriormente, da como resultado las siguientes combinaciones de carga posibles para su uso en el diseño de estructuras de corte y recubrimiento:

Load Comb. Limit State	DC		DW		EH* EV#		ES		EL	LL, IM	WA	TU, CR, SH		TG
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min				Max	Min	
Strength I	1.25	0.90	1.50	0.65	1.35	0.90	1.50	0.75	1.00	1.75	1.00	1.20	0.50	0.00
Strength II	1.25	0.90	1.50	0.65	1.35	0.90	1.50	0.75	1.00	1.35	1.00	1.20	0.50	0.00
Strength III	1.25	0.90	1.50	0.65	1.35	0.90	1.50	0.75	1.00	0.00	1.00	1.20	0.50	0.00
Service I	1.00		1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.20	1.00	0.50
Service IV	1.00		1.00		1.00		1.00		1.00	0.00	1.00	1.20	1.00	1.00
Service IVA**	0.00		0.90		0.90		0.90		0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
Extreme Event I	1.25	0.90	1.50	0.65	1.35	0.90	1.50	0.75	γEQ^+	1.00	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla 12 - Combinaciones de carga para un túnel cut and cover

Los componentes y conexiones deberán satisfacer la ecuación 4 para las combinaciones aplicables de solicitaciones extremas mayoradas según se especifica para cada uno de los siguientes estados límites:

- **Resistencia I** = Combinación de carga básica que representa el uso normal.
- **Resistencia IV** = Combinación de carga que representa relaciones muy elevadas entre las solicitaciones provocadas por las cargas permanentes y las provocadas por las sobrecargas.
- **Evento Extremo I** = Combinación de carga que incluye sismos.
- **Servicio I** = Combinación de carga que representa la operación normal del muro (con cargas sin factor), tomando todas las cargas a sus valores nominales. También se relaciona con el control de los asentamientos y deflexiones de las estructuras, revestimientos de túneles y tuberías termoplásticas y con el control del ancho de fisuración de las estructuras de concreto armado. Esta combinación de carga también se debería utilizar para investigar la estabilidad de taludes.

Los factores se deberán seleccionar de manera de producir la solicitación total mayorada extrema. Para cada combinación de cargas se deberán investigar tanto los valores extremos positivos como los valores extremos negativos. En las combinaciones de cargas en las cuales una solicitación reduce otra solicitación, a la carga que reduce la solicitación se le deberá aplicar el valor mínimo.

Para las solicitaciones debidas a cargas permanentes, se deberá seleccionar el factor de carga que produzca la combinación más crítica. Si la carga permanente aumenta la estabilidad o la capacidad de carga de un componente o puente, también se deberá investigar el valor mínimo del factor de carga para dicha carga permanente.

EJEMPLO DE DISEÑO

Históricamente se han utilizado tres métodos básicos en el diseño de estructuras de túneles tipo cut and cover:

1. La carga de servicio o el diseño de la tensión admisible, que trata cada carga de la estructura por igual en términos de su probabilidad de ocurrencia en el valor establecido. El factor de seguridad de este método se basa en la capacidad del material para soportar la carga.
2. El diseño del factor de carga tiene en cuenta la variabilidad potencial de las cargas aplicando factores de carga variables a cada tipo de carga. La resistencia de la capacidad máxima del miembro estructural se reduce mediante un factor de reducción de la resistencia y la resistencia calculada del miembro estructural debe superar la carga aplicada.
3. El diseño del factor de carga y resistencia tiene en cuenta la variación estadística tanto de la resistencia del miembro estructural como de la magnitud de las cargas aplicadas.

En el caso de que se decida llevar a cabo una revisión de la estabilidad del revestimiento del túnel entonces es necesario realizar un análisis para las cargas que están siendo aplicadas en el contorno del túnel y sus alrededores.

En la ilustración 30 se puede ver el túnel con cada una de las cargas que aplican o pueden aplicar según el criterio del diseñador.

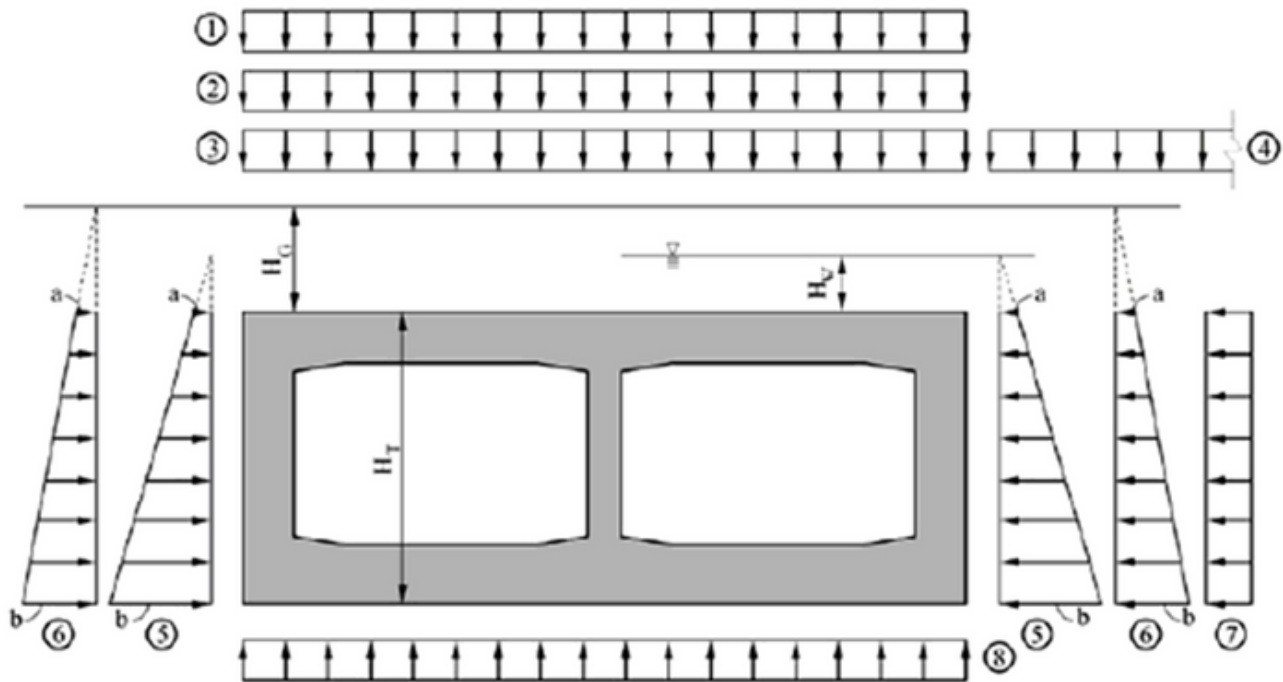


Ilustración 30 - Aplicación de cargas sobre un túnel cut and cover

1. Carga viva (LL) = determinada por las condiciones del sitio
2. Carga vertical de tierra (EV) = $y_s \times (H_g - H_w) + y_{sb} \times H_w$
3. Presión hidrostática vertical (WA) = $y_w \times H_w$
4. Carga de sobrecarga vertical (ES) = determinada por las condiciones del sitio
5. Carga hidrostática horizontal (WA): $a = y_w \times H_w$, $b = a + y_{sb} \times R_o \times H_t$
6. Carga horizontal de tierra (EH): $a = y_s \times R_o \times (H_g - H_w) + y_{sb} \times R_o \times H_w$,
 $b = a + y_{sb} \times R_o \times H_t$
7. Carga de sobrecarga horizontal (ES) = $F_s \times R_o$
8. Carga hidrostática vertical (Flotabilidad) = $y_w \times (H_w + H_t)$

Para el ejemplo que viene a continuación se tomaran en cuenta los siguientes valores, puede asumirse que el suelo es una **arena limosa (SM)** y se considerara que existe nivel freático:

- Peso unitario del hormigón, $\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$
- Peso unitario del suelo, $\gamma_s = 2082.40 \text{ kg/m}^3$
- Peso unitario del agua, $\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Peso unitario del suelo saturado, $\gamma_{\text{sat}} = 1082.85 \text{ kg/m}^3$
- Angulo de fricción del suelo = 30°
- Coeficiente de la presión de la tierra en reposo, $k_0 = 0.5$
- Coeficiente del agua para la presión de la tierra, $k_w = 1$

El túnel está situado completamente por debajo del nivel del suelo y está sujeto a la carga en todos los lados. La carga propia de la estructura de hormigón se aplica verticalmente hacia abajo como carga muerta de los componentes. Posteriormente se aplican a los muros exteriores las fuerzas de carga viva, la sobrecarga del suelo, la presión horizontal de la tierra y la presión hidrostática.

El túnel carretero cuenta con las siguientes dimensiones:

- Ancho interior de la caja, $x = 12 \text{ m}$
- Altura de la caja, $y = 6 \text{ m}$
- Espesor de la pared (losa) exterior = 0.60 m
- Espesor de la losa superior = 0.75 m
- Profundidad del suelo, $z_1 = 3 \text{ m}$
- Profundidad del agua, $z_2 = 3 \text{ m}/2 = 1.50 \text{ m}$
- Profundidad total, $D = 10.40 \text{ m}$
- Altura total del túnel, $H = 7.30 \text{ m}$

SECCION GEOMETRICA DEL TUNEL

El túnel es una estructura de caja de doble cámara de hormigón armado. Se encuentra enteramente bajo tierra y se construye con un sistema de corte y recubrimiento. Debido a que el nivel freático se encuentra por encima del túnel, las presiones hidrostáticas del suelo rodean la estructura.

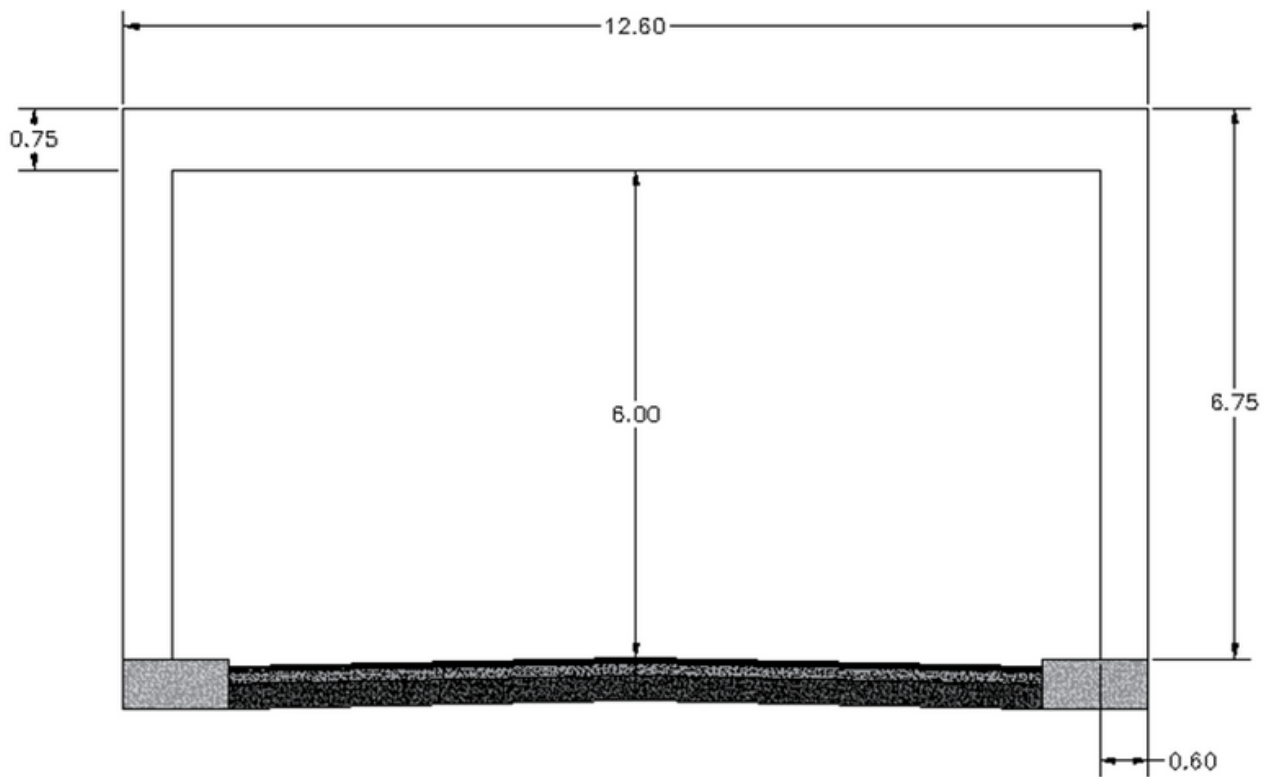


Ilustración 31 - Dimensiones en metros del túnel a diseñar

DETERMINACION DE CARGAS

El túnel está situado completamente por debajo del nivel del suelo y está sometido a cargas por todos los lados. El peso propio de la estructura de hormigón se aplica verticalmente hacia abajo como componente de carga muerta. Las cargas vivas vehiculares y la presión vertical de la tierra se aplican en la dirección vertical hacia abajo a la losa superior.

Las fuerzas de flotación se aplican verticalmente hacia arriba a la losa inferior. Las fuerzas laterales de la carga viva, la sobrecarga del suelo, la presión horizontal de la tierra y la presión hidrostática se aplican a los muros exteriores.

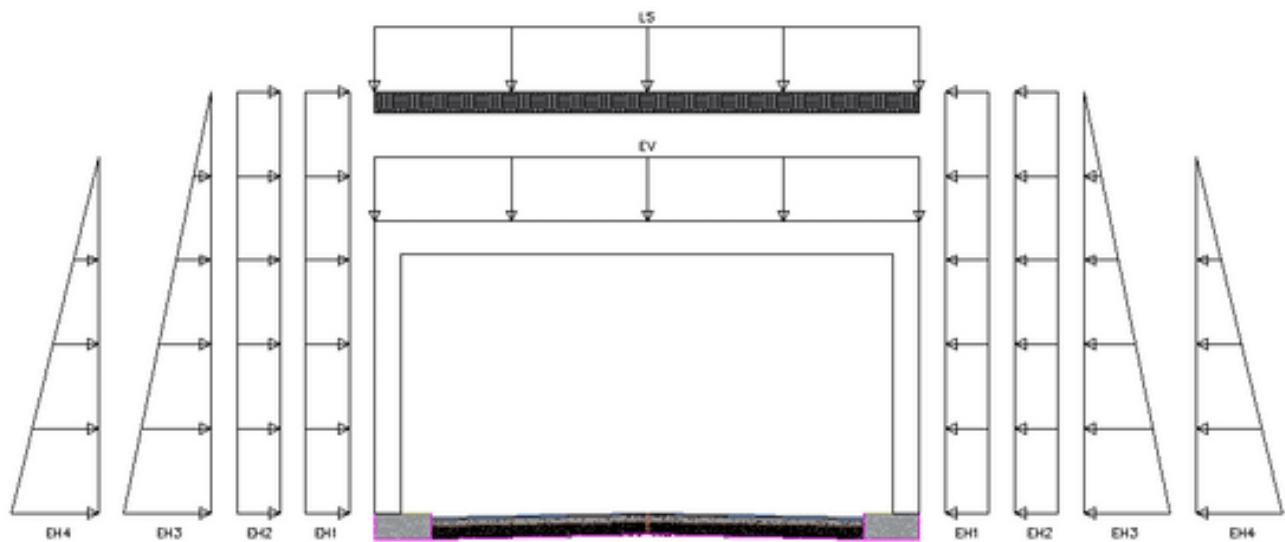


Ilustración 32 - Cargas aplicadas a la estructura del túnel

Las cargas muertas están representadas por el peso de todos los componentes de la estructura del túnel y la presión vertical del terreno debida a la carga muerta del relleno de tierra.

CARGA MUERTA DEL HORMIGON (POR PIE DE LONGITUD) (DC)

Losa superior = $(2400 \text{ kg/m}^3) \times (12 \text{ m} \times 0.762 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}) = \mathbf{6583.68 \text{ kg}}$

Paredes exteriores (hay dos paredes) = $2 \times (2400 \text{ kg/m}^3) \times (0.61 \text{ m} \times 6.10 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}) = \mathbf{5358.24 \text{ kg}}$

PRESION VERTICAL DE LA TIERRA (POR PIE DE LONGITUD) (EV)

EV = $(2082.40 \text{ kg/m}^3) \times (3 \text{ m}) = \mathbf{6247.20 \text{ kg/m}^2}$

Peso del suelo = $(6247.20 \text{ kg/m}^2) \times (12 \text{ m}) \times (0.30 \text{ m}) = \mathbf{22489.92 \text{ kg}}$

CARGA VIVA (LL)

La carga viva representa la carga de las ruedas de un vehículo de diseño HS-20. Se supone que las ruedas actúan como cargas puntuales en la superficie y se distribuyen hacia abajo en ambas direcciones a través del suelo hasta la losa superior del túnel.



Ilustración 33 - Camión de diseño para un túnel cut and cover

Debido a que la carga que muestra la ilustración 32 está considerando dos llantas esta debe de dividirse entre dos y dividirse entre 1000 para poder aplicarse sobre la estructura.

Llanta trasera = 32000 lb/2000 = 16 kip = **7257.48 kg**

Llanta intermedia = 32000 lb/2000 = 16 kip = **7257.48 kg**

Llanta delantera = 8000 lb/2000 = 4 kip = **1814.37 kg**

CARGA POR RUEDA (LL)

$$LL1 = (1814.37 \text{ kg}) / (z1)^2 = (1814.37 \text{ kg}) / (3 \text{ m})^2 = \mathbf{201.60 \text{ kg/m}^2}$$

$$LL2 = (7257.48 \text{ kg}) / (z1)^2 = (7257.48 \text{ kg}) / (3 \text{ m})^2 = \mathbf{806.40 \text{ kg/m}^2}$$

Se toma el mayor de los dos, en este caso es 806.40 kg/m², es la que controla.

RECARGO POR CARGA VIVA (POR PIE DE LONGITUD) (LS)

$$LS = (806.40 \text{ kg/m}^2) \times (12 \text{ m}) \times (0.30 \text{ m}) = \mathbf{2903.04 \text{ kg}}$$

$$\text{Altura (Ht) del recargo} = \text{Max} (qw1, qw2) / (\gamma_s) = (806.40 \text{ kg/m}^2) / (2082.40 \text{ kg/m}^3) = \mathbf{0.375 \text{ m}}$$

La presión lateral de la tierra se suele representar mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = (k_o) \times (\gamma) \times (n)$$

Las siguientes presiones laterales se aplican a las paredes exteriores del túnel:

EH1= Sobrecarga LL

EH2= Presión lateral de la tierra debida a la sobrecarga del suelo

EH3= Presión horizontal de la tierra

EH4= Presión hidrostática

Calcule las presiones laterales de la tierra:

$$EH1 = (k_o) \times (\gamma_s) \times (n_{surch}) = (0.5) \times (2082.40 \text{ kg/m}^3) \times (0.375 \text{ m}) = \mathbf{390.45 \text{ kg/m}^2}$$

$$EH2 = (k_o) \times (\gamma_s \times n_s + \gamma_{sat} \times n_{sat}) = (0.5) \times ((2082.40 \text{ kg/m}^2 \times 1.50 \text{ m}) + (1082.85 \text{ kg/m}^2 \times 1.50 \text{ m})) = \mathbf{2373.94 \text{ kg/m}^2}$$

$$EH3 = (k_o) \times (\gamma_s \times n_s + \gamma_{sat} \times n_{sat}) = (0.5) \times ((2082.40 \text{ kg/m}^2 \times 1.50 \text{ m}) + (1082.85 \text{ kg/m}^2 \times (7.40 \text{ m} + 1.50 \text{ m}))) = \mathbf{6380.48 \text{ kg/m}^2}$$

$$EH4 = (k_w) \times (\gamma_w \times n_w) = (1) \times (1000 \text{ kg/m}^3 \times (7.40 \text{ m} + 1.50 \text{ m})) = \mathbf{8900 \text{ kg/m}^2}$$

CARGA DE FLOTACION (WA)

Área de agua desplazada:

$$A = B \times H = (12 \text{ m} \times 7.40 \text{ m}) = \mathbf{88.80 \text{ m}^2}$$

Flotabilidad = $A \times \gamma_w = (88.80 \text{ m}^2 \times 1000 \text{ kg/m}^3) = 88800 \text{ kg/m}$ (a lo largo del túnel)

$$WA = \text{Flotabilidad}/B = (88800 \text{ kg/m})/(12 \text{ m}) = \mathbf{7400 \text{ kg/m}^2}$$

FACTORES DE CARGA Y COMBINACIONES

Las cargas se aplican a un modelo utilizando las combinaciones de carga del LRFD de la AASHTO. Las cargas, factores y combinaciones para los estados límite de diseño aplicables se indican en la siguiente tabla.

EV = Presión vertical de la carga muerta del relleno de tierra

DC = Carga muerta de componentes estructurales

LS = Recarga de carga viva

EH = Carga horizontal de presión de tierra

WA = Carga de agua y presión de corriente

Load Combination		LOAD FACTORS				
		EV	DC	LS	EH	WA
Limit State						
Strength 1	A	1.3	1.25	1.75	1.35	1
	B	1.3	1.25	1.75	0.9	1
	C	0.9	1.25	1.75	1.35	1
	D	0.9	1.25	1.75	0.9	1
	E	1.3	0.9	1.75	1.35	1
	F	1.3	0.9	1.75	0.9	1
	G	0.9	0.9	1.75	0.9	1
	H	0.9	0.9	1.75	1.35	1
Strength 2	A	1.3	1.25	1.35	1.35	1
	B	1.3	1.25	1.35	0.9	1
	C	0.9	1.25	1.35	1.35	1
	D	0.9	1.25	1.35	0.9	1
	E	1.3	0.9	1.35	1.35	1
	F	1.3	0.9	1.35	0.9	1
	G	0.9	0.9	1.35	0.9	1
	H	0.9	0.9	1.35	1.35	1
Strength 3	A	1.3	1.25	n	1.35	1
	B	1.3	1.25	n	0.9	1
	C	0.9	1.25	n	1.35	1
	D	0.9	1.25	n	0.9	1
	E	1.3	0.9	n	1.35	1
	F	1.3	0.9	n	0.9	1
	G	0.9	0.9	n	0.9	1
	H	0.9	0.9	n	1.35	1
Service 1		1.0	1	1	1	1
Service 4		1.0	1	n	1	1

Tabla 13 - Iteraciones de las combinaciones de carga

DIAGRAMA DEL MODELO DE ANALISIS

El modelo informático representa un trozo de un pie de ancho de la sección transversal del túnel. Los miembros están conectados por una serie de juntas en sus extremos para formar un marco, y se encuentran a lo largo de los centros de las paredes, las losas del techo y del suelo. Las juntas de las series 100 y 200 representan las losas del suelo y del techo, respectivamente. Las juntas de las series 300 y 500 representan los muros exteriores, mientras que la serie 400 representa el muro interior. El diagrama inferior muestra todas las juntas de la estructura, mientras que el diagrama superior muestra sólo las juntas en las intersecciones de las losas y los muros.

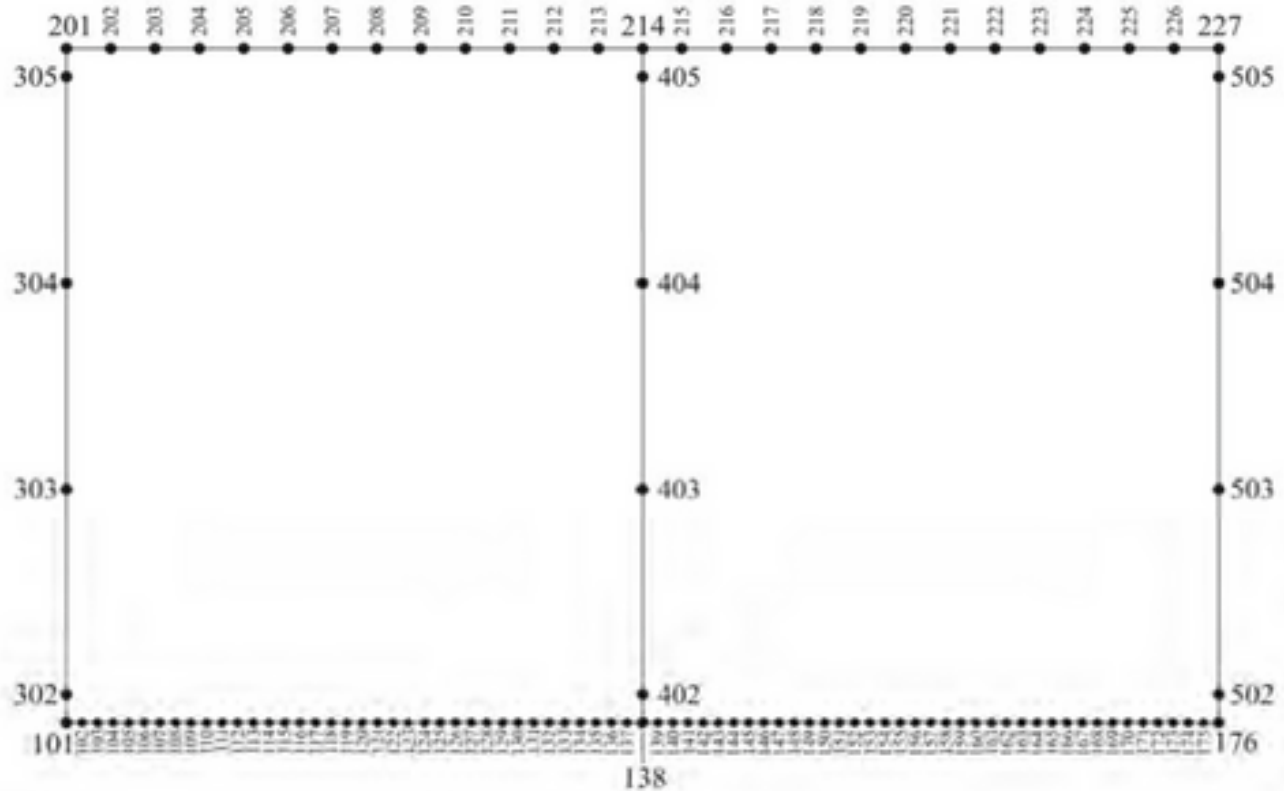


Ilustración 34 - Ejemplo de un modelo para el análisis de un túnel cut and cover

Debido a que el túnel a diseñar es simétrico, y no contiene paredes interiores ni piso de concreto, entonces nada más se analizarán las paredes exteriores y la losa de techo como si fueran marcos de concreto de un pie de ancho.

CARGA DE LOS MUROS EXTERIORES DEBIDO A LA PRESION (EH3)

Calcular la presión en la parte superior del muro:

$$k_o \times (\gamma_s \times n_s + \gamma_{sat} \times n_{sat}) = (0.5) \times ((2082.40 \text{ kg/m}^3 \times 1.50 \text{ m}) + (1082.85 \text{ kg/m}^3 \times 1.50 \text{ m})) = \mathbf{2411.92 \text{ kg/m}^2}$$

$$\text{Presión en la base del muro (EH3)} = \mathbf{6380.48 \text{ kg/m}^2}$$

Calcular el incremento del intervalo para cargar todos los miembros de la pared exterior:

$$\text{Intervalo} = (6380.48 \text{ kg/m}^2 - 2411.92 \text{ kg/m}^2)/5 = \mathbf{793.71 \text{ kg/m}^2}$$

Las dos tablas siguientes muestran los valores de la presión lateral de la tierra (kg/m²) al principio y al final de cada miembro de los muros exteriores:

Miembro	Inicio	Final
301	6380.47	5586.76
302	5586.76	4793.05
303	4793.05	3999.34
304	3999.34	3205.63
305	3205.63	2411.92

Miembro	Inicio	Final
501	-6380.47	-5586.76
502	-5586.76	-4793.05
503	-4793.05	-3999.34
504	-3999.34	-3205.63
505	-3205.63	-2411.92

CARGA DE LOS MUROS EXTERIORES DEBIDO AL AGUA (EH4)

Calcular la presión en la parte superior del muro:

$$k_w \times (\gamma_w \times n_w) = (1) \times (1000 \text{ kg/m}^3 \times 1.50 \text{ m}) = \mathbf{1500 \text{ kg/m}^2}$$

$$\text{Presión en la base del muro (EH4)} = \mathbf{8900 \text{ kg/m}^2}$$

Calcular el incremento del intervalo para cargar todos los miembros de la pared exterior:

$$\text{Intervalo} = (8900 \text{ kg/m}^2 - 1500 \text{ kg/m}^2)/5 = \mathbf{1480 \text{ kg/m}^2}$$

Las dos tablas siguientes muestran los valores de la presión lateral de la tierra (kg/m²) al principio y al final de cada miembro de los muros exteriores:

Miembro	Inicio	Final
501	8900	7420
502	7420	5940
503	5940	4460
504	4460	2980
505	2980	1500

Miembro	Inicio	Final
501	-8900	-7420
502	-7420	-5940
503	-5940	-4460
504	-4460	-2980
505	-2980	-1500

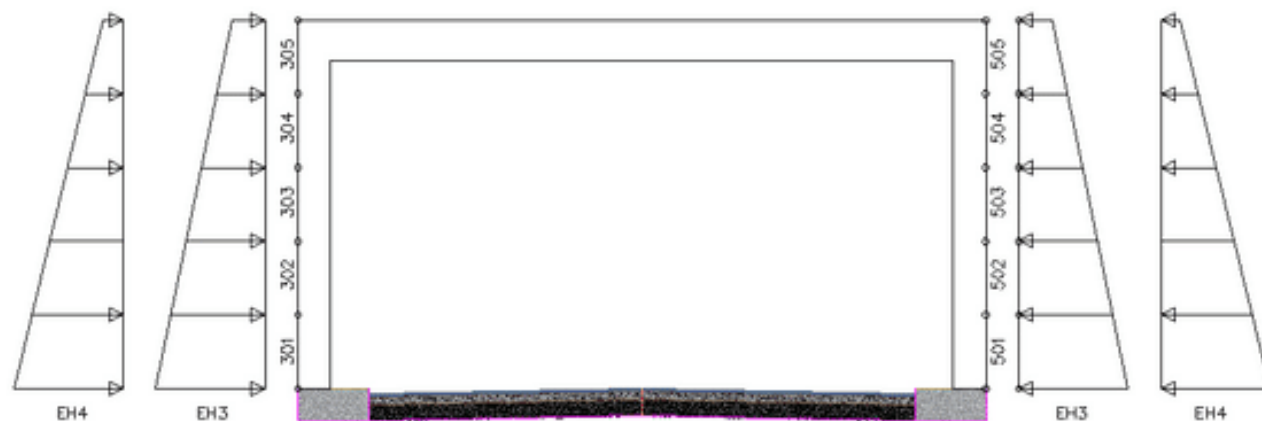


Ilustración 35 - Distribución de carga para EH3 y EH4

La anterior ilustración muestra la distribución de la carga a lo largo de los muros exteriores (elementos 301 a 305 y 501 a 505) para presión horizontal de la tierra (EH3) y presión hidrostática (EH4).

INFORMACION GENERAL

Propiedades de los materiales:

- Módulo de elasticidad del acero, $E_s = 2038901.80 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia a la fluencia de la armadura de acero, $f_y = 4218.42 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia a la compresión del hormigón, $f'_c = 281.228 \text{ kg/cm}^2$

Los factores de resistencia para el estado límite de resistencia que utiliza la construcción de hormigón convencional están referenciados en la AASHTO LRFD.

- Flexión $\Phi = 0.90$ (Φ) varía de 0.75 a 0.90 (0.75 es conservador)
- Cortante $\Phi = 0.90$
- Compresión $\Phi = 0.70$

DISEÑO DE LA LOSA SUPERIOR (TECHO)

$$K = 0.65$$

$$L_u = 12 \text{ m}$$

$$d = 0.75 \text{ m}$$

$$\text{Inercia (I)} = ((0.30 \text{ m}) \times (0.75 \text{ m})^3)/12 = 0.010 \text{ m}^4$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$d_s = 0.70 \text{ m}$$

$$d's = 0.08 \text{ m}$$

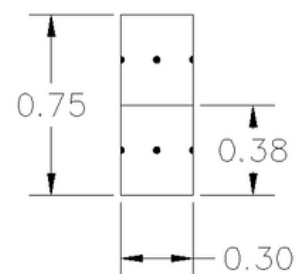
$$r = \sqrt{(I/(12 \times d))} = 0.22 \text{ m}$$

Se probara con la varilla #9, de no cumplir con las verificaciones se debe de aumentar el numero de la varilla.

$$\text{Diámetro de la barra \#9} = 3.38 \text{ cm}$$

$$\text{Área de la barra \#9} = 6.42 \text{ cm}^2$$

$$K \times (L_u/r) = (0.65) \times ((12 \text{ m})/(0.22 \text{ m})) = 33.50$$



Considerando la carga viva y la carga del suelo sobre la losa superior, se aplican los factores de carga del **Estado Limite de Resistencia 1**:

$$EV = 6247.20 \text{ kg/m}^2 \times 0.30 \text{ m} = 0.90 \times 1874.10 \text{ kg/m} = \mathbf{1686.69 \text{ kg/m}}$$

$$LS = 806.40 \text{ kg/m}^2 \times 0.30 \text{ m} = 1.75 \times 241.92 \text{ kg/m} = \mathbf{423.36 \text{ kg/m}}$$

Asumiendo que la losa superior esta simplemente apoyada:

$$M = ((1686.69 \text{ kg/m} + 423.36 \text{ kg/m}) \times (12 \text{ m}^2))/8 = \mathbf{37980.90 \text{ kg-m}}$$

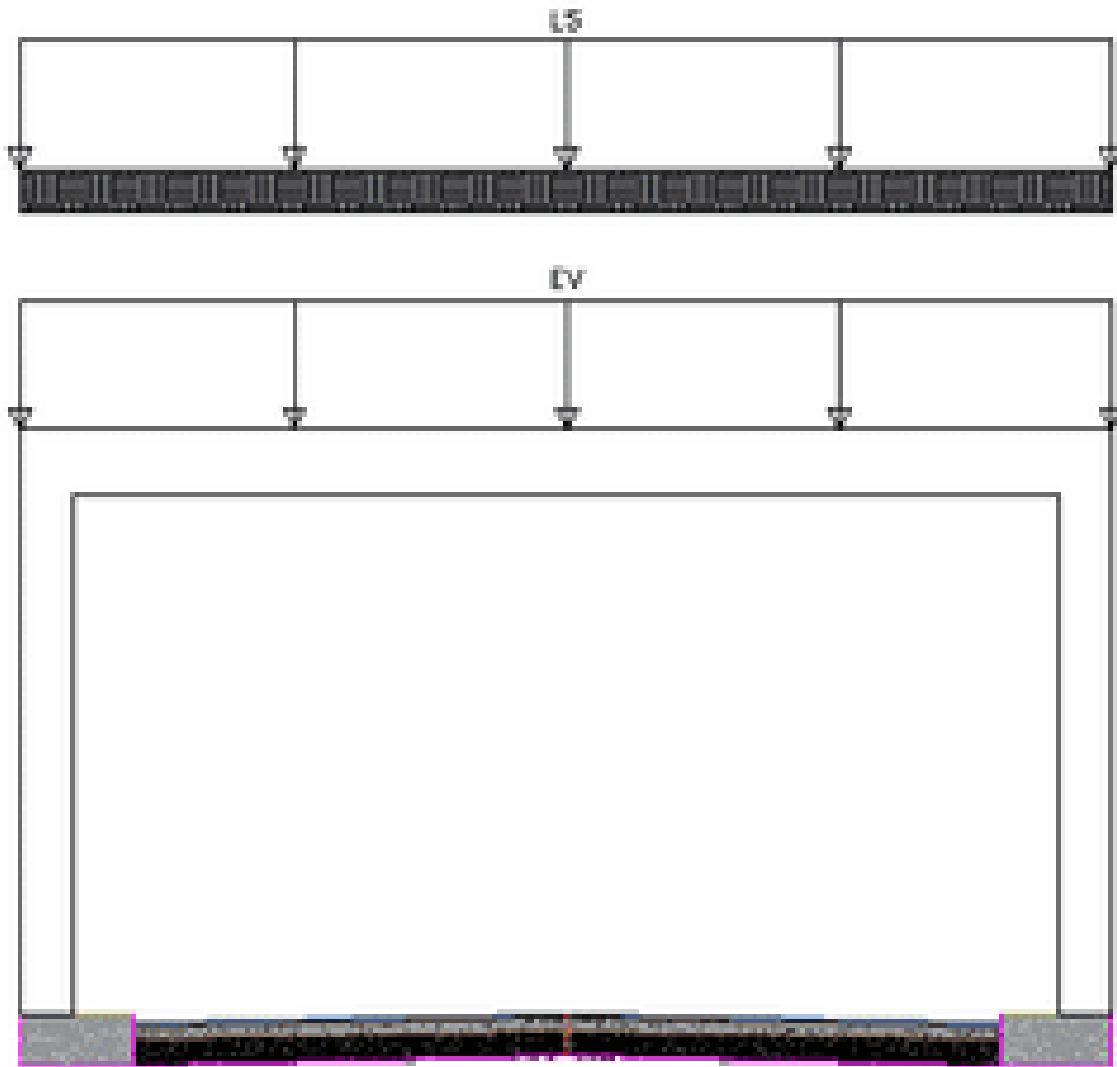


Ilustración 36 - Cargas verticales sobre la losa superior

Calcular EI usando las siguientes ecuaciones:

$$E_c = 33000 \times (\gamma_c^{1.5}) \times (f'_c^{0.5}) = (33000) \times (0.15 \text{ kcf}^{1.5}) \times (4 \text{ ksi}^{0.5}) = 3834.25 \text{ ksi} = \mathbf{2,695,744,535.7438 \text{ kg/m}}$$

$$I_g = 0.011 \text{ m}^4$$

$$c = 0.32 \text{ m}$$

$$A_s = 0.0013 \text{ m}^2$$

$$\text{Inercia de la varilla \#9 (I_c)} = \pi \times (\text{diámetro}^4)/64$$

$$I_c = \pi \times (0.0338 \text{ m}^4)/64 = \mathbf{6.41 \times 10^{-8} \text{ m}^4}$$

$$I_s = 2 \times (I_c + (A_s \times c^2)) = 2 \times ((6.41 \times 10^{-8} \text{ m}^4) + (0.0013 \text{ m}^2 \times (0.32 \text{ m})^2)) = \mathbf{2.66 \times 10^{-4} \text{ m}^4}$$

$$M_{no} = M_u = \mathbf{29724.81 \text{ kg-m}}$$

$$\beta_d = M_u/M_2 = (29724.81 \text{ kg-m}/37980.90 \text{ kg-m}) = 0.84$$

$$EI_1 = (E_c \times I_g/5 + E_s \times I_s)/(1 + \beta_d) = ((3834.25 \text{ ksi}) \times (27000 \text{ in}^4/5) + (29000 \text{ ksi}) \times (625.16 \text{ in}^4))/(1 + 0.84)$$

$$EI_1 = 21105755.43 \text{ kip-in}^2$$

$$EI_2 = (E_c \times I_g/2.5)/(1 + \beta_d) = ((3834.25 \text{ ksi}) \times (27000 \text{ in}^4/2.5))/(1 + 0.84)$$

$$EI_2 = 22505380.43 \text{ kip-in}^2$$

Se toma el EI2, ya que es el que controla.

Lo siguiente es revisar los momentos obtenidos anteriormente para comprobar si el acero de refuerzo es el adecuado; aplicando los factores de resistencia:

La resistencia factorizada M_r se tomará como:

- $M_r = \Phi M_n$

Donde:

Φ = factor de resistencia = 0.9

M_n = resistencia o momento nominal

La resistencia nominal a la flexión puede tomarse como:

- $M_n = (A_s \times f_y) \times (d_s - a/2) - (A'_s \times f_y) \times (d'_s - a/2)$

No considerar el acero de compresión para el cálculo de M_n .

Donde:

- A_s = área de la armadura de tracción no tensada (m^2)
- f_y = límite elástico especificado de las barras de refuerzo (kg/cm^2)
- d_s = distancia desde la fibra de compresión extrema al centroide de la armadura de tracción no tensada (m)
- a = profundidad del bloque de tensión equivalente (m) = $\beta_1 \times c$

Donde:

- β_1 = factor de bloqueo de tensiones = 0.85
- c = distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro
- $c = (A_s \times f_y) / (0.85 \times f'_c \times \beta_1 \times b)$

En este caso:

$$A_s = 0.000642 \text{ m}^2 \times 2 = 0.0013 \text{ m}^2$$

$$f_y = 4218.42 \text{ kg/cm}^2 = 42184200 \text{ kg/m}^2$$

$$f'_c = 281.228 \text{ kg/cm}^2 = 2812280 \text{ kg/m}^2$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$b = 0.30 \text{ m}$$

$$c = (0.0013 \text{ m}^2 \times (4218.42 \text{ kg/cm}^2)) / (0.85 \times (281.228 \text{ kg/cm}^2) \times (0.85) \times (0.30 \text{ m}))$$

$$c = 0.088 \text{ m}$$

$$a = \beta_1 \times c = 0.85 \times 0.088 \text{ m} = 0.075 \text{ m}$$

Ahora se aplica la formula del momento nominal:

$$M_n = (0.0013 \text{ m}^2)(42184200 \text{ kg/m}^2)(0.70 \text{ m} - (0.075 \text{ m}/2)) - (0.0013 \text{ m}^2)(42184200 \text{ kg/m}^2)(0.082 \text{ m} - (0.075 \text{ m}/2))$$

$$M_n = \mathbf{36332.02 \text{ kg-m}}$$

$$\Phi M_n = 0.9 \times (36332.02 \text{ kg-m}) = \mathbf{32698.82 \text{ kg-m}}$$

$$M_r = \Phi M_n = \mathbf{32698.82 \text{ kg-m}}$$

$$M_r > M_u = \mathbf{29724.81 \text{ kg-m}} \text{ (OK)}$$

DISEÑO POR CORTE (LOSA SUPERIOR)

La resistencia nominal al corte, V_n , se determinará como el menor de los siguientes valores:

$$V_n = V_c + V_s \quad \text{o} \quad V_n = 0.25 \times (f'_c) \times (b_v) \times (d_v)$$

Donde:

$$(V_u \times d_e)/(M_u) \leq 1$$

Para el cortante del hormigón de la losa (V_c):

$$V_s = (A_v \times f_y \times d_v)/(s)$$

Donde:

- A_s = área de acero de refuerzo en el ancho de diseño (m^2) = 0.0013 m^2
- b = ancho de diseño (m) = $0.30 \text{ m} = 30 \text{ cm}$
- d_e = profundidad efectiva desde la fibra de compresión extrema hasta el centro de la fuerza de tracción en el refuerzo de tracción (m) = $d_s = 0.70 \text{ m}$
- V_u = esfuerzo cortante de las cargas factorizadas (kg) = 12700.59 kg
- M_u = momento de las cargas factorizadas (kg-m)

- $A_v = \text{área de la armadura de corte en una distancia } s \text{ (m}^2) = 0 \text{ m}^2$
- $s = \text{separación de los estribos (m)} = 0.30 \text{ m}$
- $b_v = \text{ancho efectivo del alma tomado como el ancho mínimo del alma dentro de la profundidad } d_v \text{ (m)}$
- $d_v = \text{profundidad efectiva de corte tomada como la distancia perpendicular al eje neutro (m)}$
- $d_v = d_s - a = 0.70 \text{ m} - 0.075 \text{ m} = 0.625 \text{ m} = 62.5 \text{ cm}$

$$V_u = \mathbf{12700.59 \text{ kg}}$$

$$M_u = \mathbf{8710.06 \text{ kg}\cdot\text{m}}$$

$$V_c = (0.0676\sqrt{f'_c} + 4.6 \frac{(A_s)(V_u)(d_e)}{(b)(d_e)(M_u)})(b)(d_e) = 0.126\sqrt{f'_c}(b)(d_e)$$

$$V_c = (0.0676 \times ((2812280 \text{ kg/m}^2)^{0.5}) + (4.6 \times 0.0013 \text{ m}^2 \times 12700.59 \text{ kg} \times 0.70 \text{ m}) / (0.30 \text{ m} \times 0.70 \text{ m} \times 8710.06 \text{ kg}\cdot\text{m})) \times (0.30 \text{ m} \times 0.70 \text{ m}) = \mathbf{28766.83 \text{ kg}}$$

$$V_c = 0.53 \times 2 \times ((281.228 \text{ kg/cm}^2)^{0.5}) \times (30 \text{ cm}) \times (70 \text{ cm}) = \mathbf{38065.47 \text{ kg}}$$

$$V_c = 28766.83 \text{ kg} \leq 38065.47 \text{ kg}$$

Domina el menor valor que es 28766.83 kg.

Debido a que $A_v = 0 \text{ m}^2$:

$$V_s = 0 \text{ kg}$$

$$V_n = (28766.83 \text{ kg}) + (0 \text{ kg}) = \mathbf{28766.83 \text{ kg}}$$

$$V_n = 0.25 \times (2812280 \text{ kg/m}^2) \times (0.30 \text{ m}) \times (0.625 \text{ m}) = \mathbf{131825.625 \text{ kg}}$$

Domina el menor valor que es 28766.83 kg.

$$\Phi = 0.90$$

$$\Phi V_n = 0.90 \times (28766.83 \text{ kg}) = \mathbf{25890.147 \text{ kg}}$$

$$\Phi V_n > V_u = \mathbf{12700.59 \text{ kg}} \text{ (OK)}$$

REVISIÓN DEL ACERO

ρ_{\min} = cuantía mínima = $(A_s \min)/(A_g)$

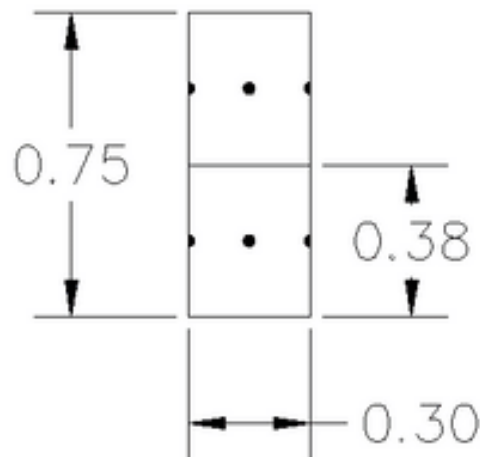
A_g = area de la sección gruesa = $(0.75 \text{ m}) \times (0.30 \text{ m}) = \mathbf{0.225 \text{ m}^2}$

Asumir $\rho_{\min} = 1\% = 0.01$

$A_s \min = (0.01) \times (0.225 \text{ m}^2) = \mathbf{0.00225 \text{ m}^2}$

Área de la barra #9 = $6.42 \text{ cm}^2 = \mathbf{0.000642 \text{ m}^2}$

As proveído = se pondrán dos barras arriba (compresión) y dos abajo (tension) de la sección = $(0.000642 \text{ m}^2) \times (4) = \mathbf{0.00257 \text{ m}^2} > 0.00225 \text{ m}^2$ (OK)



Se concluye que la losa superior se puede reforzar con dos camillas compuestas por varilla #9 y espaciada cada 15 cm respectivamente.

#9 @ 15 cm

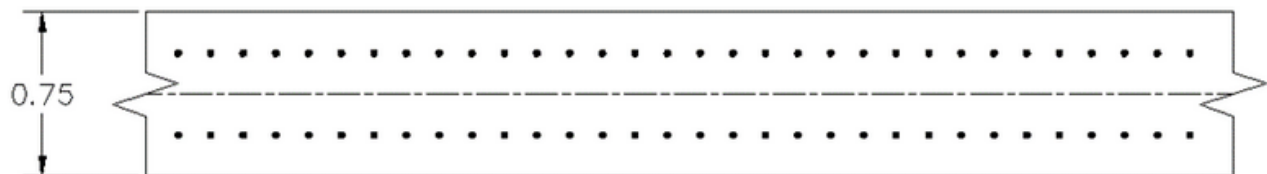


Ilustración 37 - Detalle de la losa superior

DISEÑO DE LAS LOSAS EXTERIORES (PAREDES)

$$K = 0.65$$

$$L_u = 6.75 \text{ m}$$

$$d = 0.60 \text{ m}$$

$$\text{Inercia (I)} = ((0.30 \text{ m}) \times (0.60 \text{ m})^3) / 12 = 0.0058 \text{ m}^4$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$d_s = 0.55 \text{ m}$$

$$d's = 0.082 \text{ m}$$

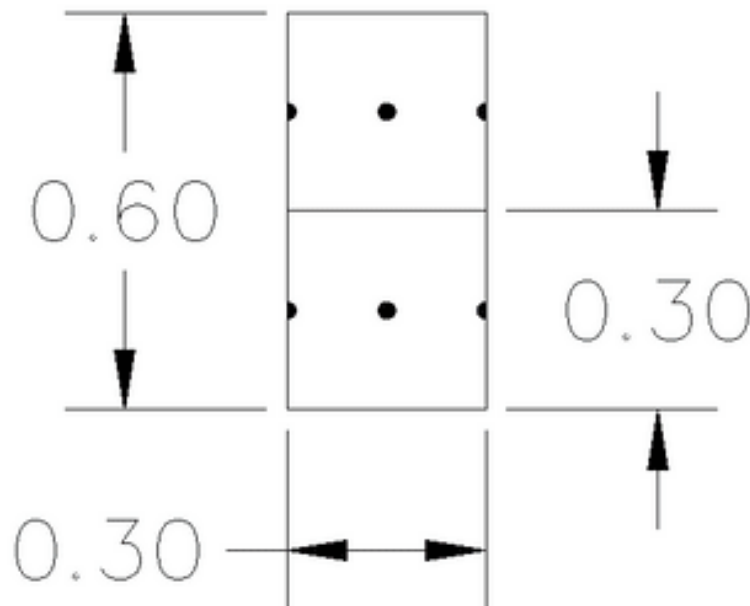
$$r = \sqrt{I / (12 \times d)} = 0.18 \text{ m}$$

Se probara con la varilla #8, de no cumplir con las verificaciones se debe de aumentar el numero de la varilla.

$$\text{Diámetro de la barra \#8} = 2.54 \text{ cm}$$

$$\text{Área de la barra \#8} = 5.07 \text{ cm}^2$$

$$K \times (L_u / r) = (0.65) \times ((6.75 \text{ m}) / (0.18 \text{ m})) = 24.40$$



Considerando las cargas horizontales EH3 y EH4 sobre las paredes, se aplican los factores de carga del **Estado Limite de Resistencia 1**:

EH3 (Carga trapezoidal):

$$\text{Inicio} = (6380.47 \text{ kg/m}^2) \times (0.30 \text{ m}) = \mathbf{1914.14 \text{ kg/m}}$$

$$\text{Final} = (2411.92 \text{ kg/m}^2) \times (0.30 \text{ m}) = \mathbf{723.58 \text{ kg/m}}$$

$$M = 0.9 \times 7552.70 \text{ kg-m} = \mathbf{10196.15 \text{ kg-m}}$$

EH4 (Carga trapezoidal):

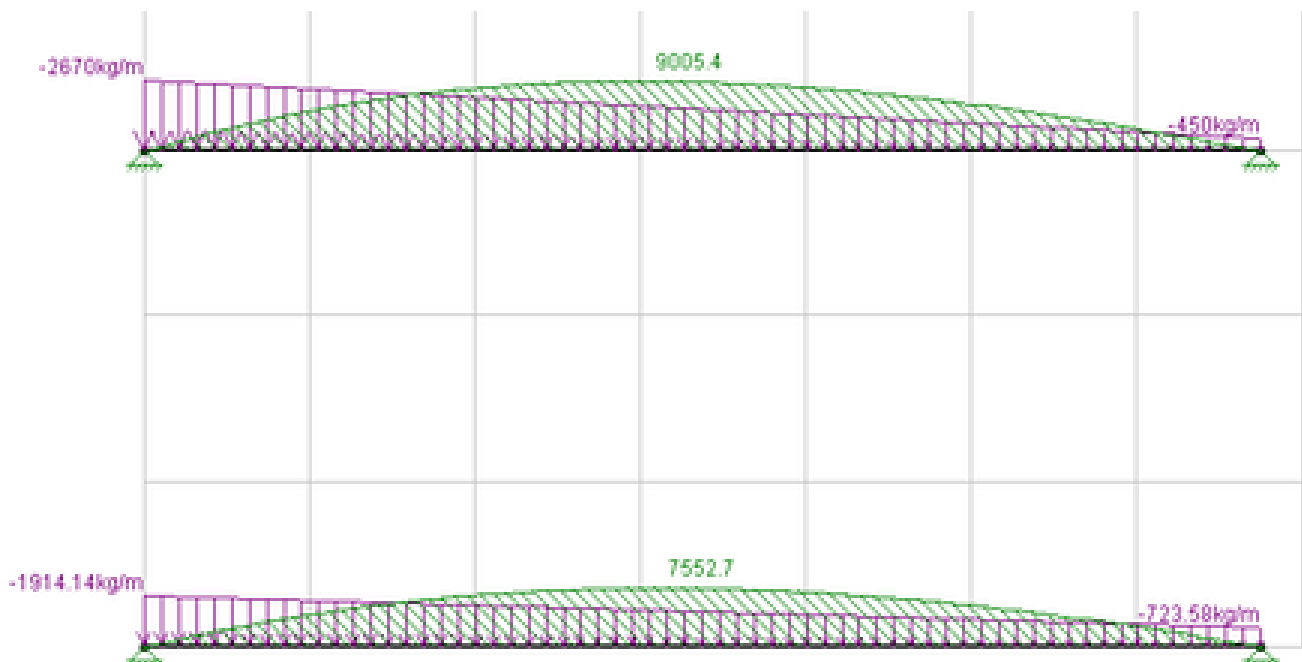
$$\text{Inicio} = (8900 \text{ kg/m}^2) \times (0.30 \text{ m}) = \mathbf{2670 \text{ kg/m}}$$

$$\text{Final} = (1500 \text{ kg/m}^2) \times (0.30 \text{ m}) = \mathbf{450 \text{ kg/m}}$$

$$M = 0.9 \times 9005.40 \text{ kg-m} = \mathbf{8104.86 \text{ kg-m}}$$

$$M_{\text{total}} = 10196.15 \text{ kg-m} + 8104.86 \text{ kg-m} = \mathbf{18301.01 \text{ kg-m}}$$

Para la determinación de los momentos de las cargas trapezoidales es necesario hacer el análisis por separado con el uso de un programa, por ejemplo, RISA-2D o STAAD PRO.



Calcular EI usando las siguientes ecuaciones:

$$E_c = 33000 \times (\gamma_c^{1.5}) \times (f'_c)^{0.5} = (33000) \times (0.15 \text{ kcf}^{1.5}) \times (4 \text{ ksi}^{0.5}) = 3834.25 \text{ ksi} = \mathbf{2,695,744,535.7438 \text{ kg/m}}$$

$$I_g = 0.0058 \text{ m}^4 \qquad c = 0.24 \text{ m} \qquad A_s = 0.00064516 \text{ m}^2$$

Inercia de la varilla #8 (I_c) = $\pi \times (\text{diámetro}^4)/64$
 $\pi \times (0.0254 \text{ m}^4)/64 = \mathbf{2.04 \times 10^{-8} \text{ m}^4}$

$$I_s = 2 \times (I_c + (A_s \times c^2)) = 2 \times ((2.04 \times 10^{-8} \text{ m}^4) + (0.00064516 \text{ m}^2 \times (0.24 \text{ m})^2)) = \mathbf{0.0001187467 \text{ m}^4}$$

$$M_{no} = M_u = \mathbf{8461.20 \text{ kg-m}}$$

$$\beta_d = M_u/M_2 = (8461.20 \text{ kg-m}/18301.01 \text{ kg-m}) = 0.45$$

$$EI_1 = (E_c \times I_g/5 + E_s \times I_s)/(1+\beta_d) = ((3834.25) \times (13824/5) + (29000) \times (285.29))/(1+0.45)$$

$$EI_1 = 13016768.24 \text{ kip-in}^2$$

$$EI_2 = (E_c \times I_g/2.5)/(1 + \beta_d) = ((3834.25) \times (13824/2.5))/(1+0.45)$$

$$EI_2 = 14621978.48 \text{ kip-in}^2$$

Se toma el EI2, ya que es el que controla.

Lo siguiente es revisar los momentos obtenidos anteriormente para comprobar si el acero de refuerzo es el adecuado; aplicando los factores de resistencia:

La resistencia factorizada M_r se tomará como:

- $M_r = \Phi M_n$

Donde:

Φ = factor de resistencia = 0.9

M_n = resistencia nominal (kip-in)

La resistencia nominal a la flexión puede tomarse como:

- $M_n = (A_s \times f_y) \times (d_s - a/2) - (A'_s \times f_y) \times (d'_s - a/2)$

No considerar el acero de compresión para el cálculo de M_n .

Donde:

- A_s = área de la armadura de tracción no tensada (m^2)
- f_y = límite elástico especificado de las barras de refuerzo (kg/cm^2)
- d_s = distancia desde la fibra de compresión extrema al centroide de la armadura de tracción no tensada (m)
- a = profundidad del bloque de tensión equivalente (m) = $\beta_1 \times c$

Donde:

- β_1 = factor de bloqueo de tensiones = 0.85
- c = distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro
- $c = (A_s \times f_y) / (0.85 \times f'_c \times \beta_1 \times b)$

Donde:

$$A_s = 0.000507 \text{ m}^2 \times 2 = 0.0010 \text{ m}^2$$

$$f_y = 4218.42 \text{ kg/cm}^2 = 42184200 \text{ kg/m}^2$$

$$f'_c = 281.228 \text{ kg/cm}^2 = 2812280 \text{ kg/m}^2$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$b = 0.30 \text{ m}$$

$$c = (0.0010 \text{ m}^2 \times (4218.42 \text{ kg/cm}^2)) / (0.85 \times (281.228 \text{ kg/cm}^2) \times (0.85) \times (0.30 \text{ m}))$$

$$c = 0.070 \text{ m}$$

$$a = \beta_1 \times c = 0.85 \times 0.070 \text{ m} = 0.0595 \text{ m} = 0.060 \text{ m}$$

Ahora se aplica la formula del momento nominal:

$$M_n = (0.0013 \text{ m}^2)(42184200 \text{ kg/m}^2)(0.55 \text{ m} - (0.060 \text{ m}/2)) - (0.0013 \text{ m}^2)(42184200 \text{ kg/m}^2)(0.082 \text{ m} - (0.060 \text{ m}/2))$$

$$M_n = \mathbf{22487.16 \text{ kg-m}}$$

$$\Phi M_n = 0.9 \times (22487.16 \text{ kg-m}) = \mathbf{20238.44 \text{ kg-m}}$$

$$M_r = \Phi M_n = \mathbf{20238.44 \text{ kg-m}}$$

$$M_r > M_u = \mathbf{18301.01 \text{ kg-m}} \text{ (OK)}$$

DISEÑO POR CORTE

La resistencia nominal al corte, V_n , se determinará como el menor de los siguientes valores:

$$V_n = V_c + V_s$$

o

$$V_n = 0.25 \times f'_c \times b_v \times d_v$$

Donde:

$$(V_u \times d_e)/(M_u) \leq 1$$

Para el cortante del hormigón de la losa (V_c):

$$V_s = (A_v \times f_y \times d_v)/(s)$$

Donde:

- A_s = área de acero de refuerzo en el ancho de diseño (m^2) = 0.0010 m^2
- b = ancho de diseño (m) = 0.30 m
- d_e = profundidad efectiva desde la fibra de compresión extrema hasta el centro de la fuerza de tracción en el refuerzo de tracción (m) = d_s = 0.55 m
- V_u = esfuerzo cortante de las cargas factorizadas (kg) = 9430.19 kg
- M_u = momento de las cargas factorizadas (kg-m)

- A_v = área de la armadura de corte en una distancia s (m^2) = m^2
- s = distancia de los estribos (m) = 0.30 m
- b_v = ancho efectivo del alma tomado como el ancho mínimo del alma dentro de la profundidad d_v (m)
- d_v = profundidad efectiva de corte tomada como la distancia perpendicular al eje neutro (m)
- $d_v = d_s - a = 0.55 \text{ m} - 0.059 \text{ m} = 0.49 \text{ m} = 49 \text{ cm}$

$$V_u = \mathbf{9430.19 \text{ kg}}$$

Donde:

$$b_v = 0.30 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

$$V_c = 0.53 \times (f'_c)^{0.5} \times (b_v) \times (d_v) = 0.53 \times ((281.228 \text{ kg/cm}^2)^{0.5}) \times (30 \text{ cm}) \times (49 \text{ cm}) = \mathbf{13467.16 \text{ kg}}$$

$$V_c = \mathbf{13467.16 \text{ kg}}$$

Domina el menor valor que es 13467.16 kg.

Debido a que $A_v = 0 \text{ m}^2$:

$$V_s = 0 \text{ kg}$$

$$V_n = (13467.16 \text{ kg}) + (0 \text{ kg}) = \mathbf{13467.16 \text{ kg}}$$

$$V_n = 0.25 \times (281.228 \text{ kg/cm}^2) \times (30 \text{ cm}) \times (49 \text{ cm}) = \mathbf{105759.60 \text{ kg}}$$

Domina el menor valor que es 105759.60 kg.

$$\Phi = 0.90$$

$$\Phi V_n = 0.90 \times (105759.60 \text{ kg}) = \mathbf{95183.64 \text{ kg}}$$

$$\Phi V_n > V_u = \mathbf{9430.19 \text{ kg}} \text{ (OK)}$$

REVISIÓN DEL ACERO

ρ_{min} = cuantía mínima = $(A_s \text{ min}) / (A_g)$

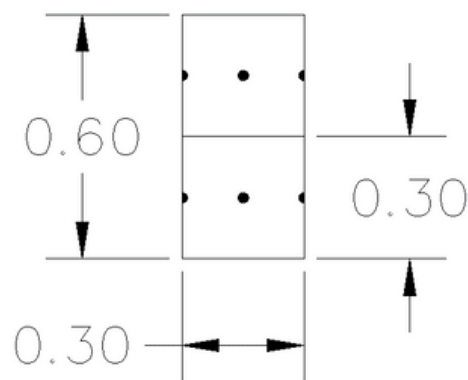
A_g = area de la sección gruesa = $(0.60 \text{ m}) \times (0.30 \text{ m}) = \mathbf{0.18 \text{ m}^2}$

Asumir $\rho_{min} = 1\% = 0.01$

$A_s \text{ min} = (0.01) \times (0.18 \text{ m}^2) = \mathbf{0.0018 \text{ m}^2}$

Área de la barra #8 = $5.07 \text{ cm}^2 = \mathbf{0.000507 \text{ m}^2}$

As proveído = se pondrán dos barras arriba (compresión) y dos abajo (tension) de la sección = $(0.000507 \text{ m}^2) \times (4) = \mathbf{0.00202 \text{ m}^2} > 0.0018 \text{ m}^2$ (OK)



Se concluye que las losas laterales que componen el túnel se pueden reforzar con dos camillas compuestas por varilla #8 y espaciada cada 15 cm respectivamente.



Ilustración 38 - Detalle de la losa exterior lateral

En el capítulo 11 del manual pueden verse los planos hechos en el mismo Civil 3D mostrando cada detalle anteriormente explicado y desarrollado.

07

CAPÍTULO 7

SEÑALIZACIÓN

**SEÑALIZACIÓN
VERTICAL**

PG 110

**SEÑALIZACIÓN
HORIZONTAL**

PG 122

07

La señalización para túneles carreteros tiene como finalidad regular su uso, facilitando a los usuarios su utilización segura y eficiente. La señalización es uno de los medios con los que cuenta el operador para comunicarse con el usuario. Según su propósito y ubicación la señalización se clasifica en horizontal y vertical.

SEÑALIZACIÓN VERTICAL

Es el conjunto de tableros fijados en postes, marcos u otras estructuras, integrados con leyendas y símbolos que tienen el propósito de regular el uso del túnel carretero, transmitiendo al usuario un mensaje preventivo, restrictivo o informativo.

En túneles carreteros es muy importante informar al usuario oportunamente de los servicios, instalaciones especiales y características geométricas del túnel. Dependiendo del nivel de equipamiento de cada túnel, el proyectista deberá diseñar el señalamiento vertical para cada caso en particular, evitando saturar al usuario de información.



La señalización vial se utiliza para identificar ciertos equipos de seguridad en los túneles, como los siguientes:

- Apartaderos
- Salidas de emergencia
- Vías de evacuación (deberá ser señalizada en las paredes a distancias no superiores a 25 metros, y a una altura de entre 1 y 1.5 metros por encima del nivel de vía de evacuación.
- Puestos de emergencia (teléfonos de emergencia y extintores)

La señalización vertical referente a las especificaciones de circulación se colocará 50 metros antes de la boca de entrada al túnel. Se puede aumentar la longitud por factores como la dificultad de visibilidad. Cuando el túnel tenga una longitud superior a los 1000 metros, se debe indicar cada 500 metros la longitud restante mediante un panel alfanumérico.

Señalización para instalaciones:

- Señalización de carriles
- Estaciones de emergencia: se deben colocar cada 150 metros o menos.
- Apartaderos o bahías: los muros de estos lugares se pueden pintar de verde para enfatizar que son parte de los elementos de seguridad vial.
- Salidas de emergencia: En ambas direcciones de un túnel se deben señalar en sus paredes laterales las vías de escape más próximas (normalmente una en cada dirección) con al menos una señal cada 25 metros., a una altura de 1 metros, con indicación de las distancias a ellas.

SEÑALIZACIÓN EN LA ENTRADA DEL TÚNEL

Estas señalizaciones típicas deben variar según el tipo, diseño y facilidades de cada túnel en particular.

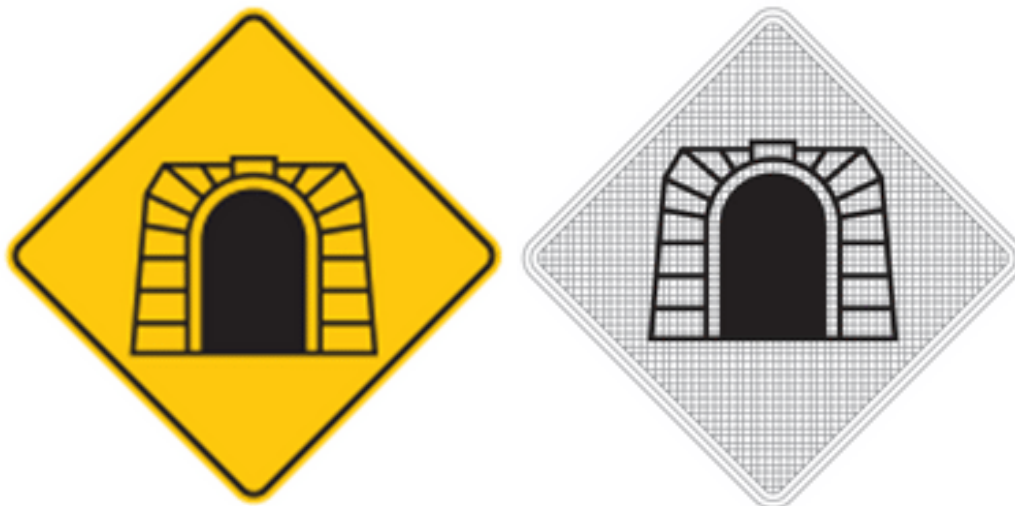
De haber situaciones adicionales en esta zona que requieran de señalización, éstas deben ser intercaladas considerando los requerimientos y prioridad de cada una de ellas. En general, el largo de esta zona no debería superar 1 km.

Normalmente, ante la proximidad de un túnel se consideran las siguientes señales:



Ilustración 39 - Señalización próxima a la entrada del túnel

Esta señal se utiliza para advertir al conductor la proximidad a un túnel.



VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
MENOR O IGUAL A 50 KM/H



Matriz 64x64 módulos
Módulo 1,2x1,2 cm.

VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
DE 60 KM/H O 70 KM/H



Matriz 64x64 módulos
Módulo 1,5x1,5 cm.

VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
DE 80 KM/H O 90 KM/H



Matriz 64x64 módulos
Módulo 1,8x1,8 cm.

VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
SUPERIOR A 90 KM/H



Matriz 64x64 módulos
Módulo 2,4x2,4 cm.

Ilustración 40 - Señal de entrada al túnel

De contar con un sistema de radio dedicado en el túnel, se debe indicar a los usuarios la frecuencia de ésta; la señal será ubicada antes de su entrada y repetida cada 1000 m en túneles de gran longitud. Esta señal también se puede usar en las carreteras que funcione un sistema de radio dedicado exclusivamente a brindar información de la vía.

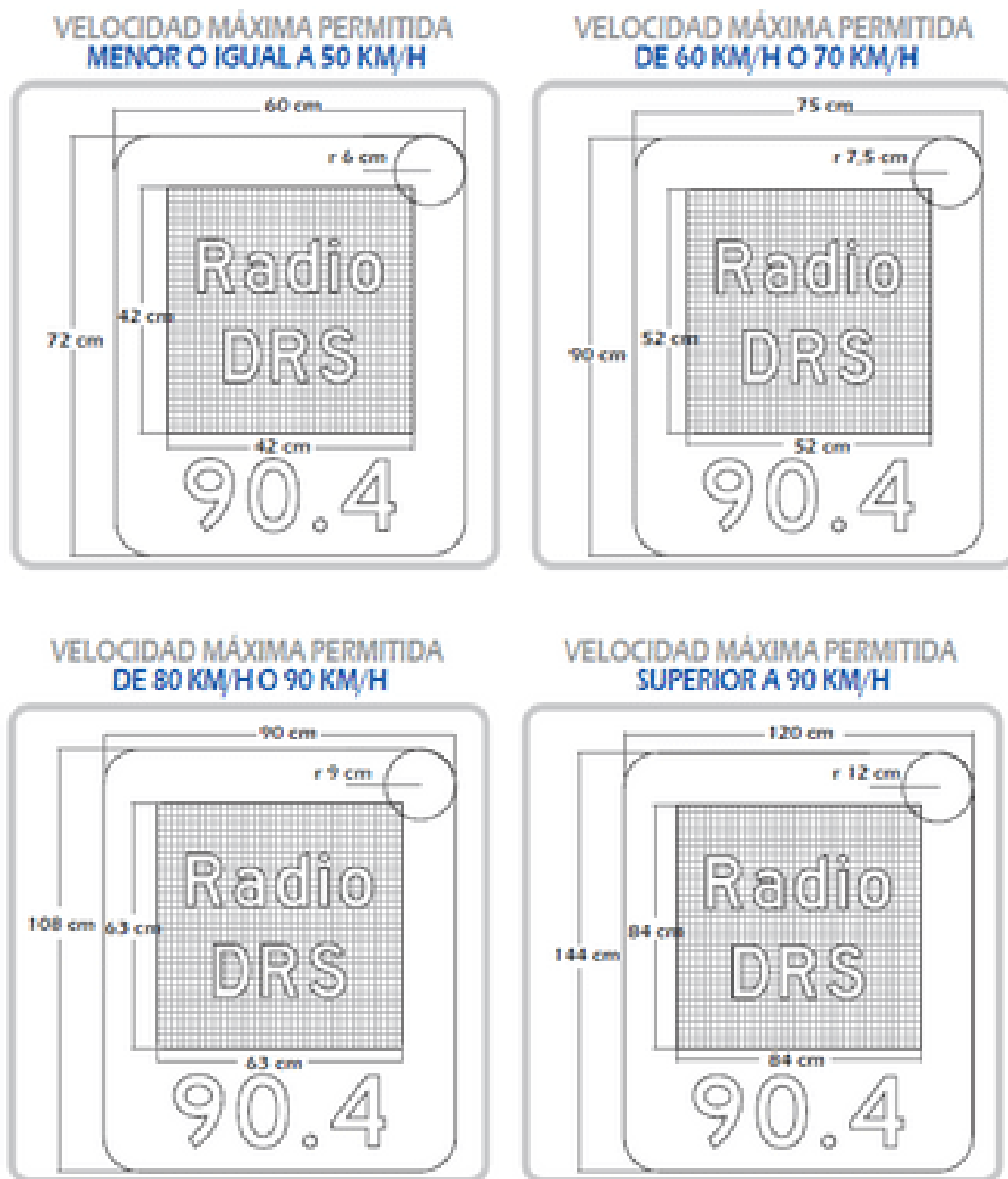


Ilustración 41 - Señal que indica el radio del túnel

Esta señal se usa para advertir al conductor que más adelante en la vía existe una restricción de altura en un túnel, puente, paso a desnivel, u otros. La cifra anotada debe aproximarse a la décima inferior; por ejemplo 4.55 m, se indica en la señal 4.50 m.



VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
MENOR O IGUAL A 50 KM/H



Matriz 64x64 módulos
Módulo 1,2x1,2cm.

VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
DE 50KM/H A 60 KM/H



Matriz 64x64 módulos
Módulo 1,5x1,5 cm.

VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
DE 80 KM/H A 90 KM/H



Matriz 64x64 módulos
Módulo 1,8x1,8 cm.

VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
SUPERIOR A 90 KM/H



Matriz 64x64 módulos
Módulo 2,4x2,4 cm.

Ilustración 42 - Señal que indica la altura libre del túnel

Se usan para prohibir o limitar el tránsito de ciertos tipos de vehículos o determinados movimientos. La prohibición se representa mediante un círculo blanco con orla roja cruzado por una diagonal también roja, descendente desde la izquierda la cual forma un ángulo de 45° con la horizontal.

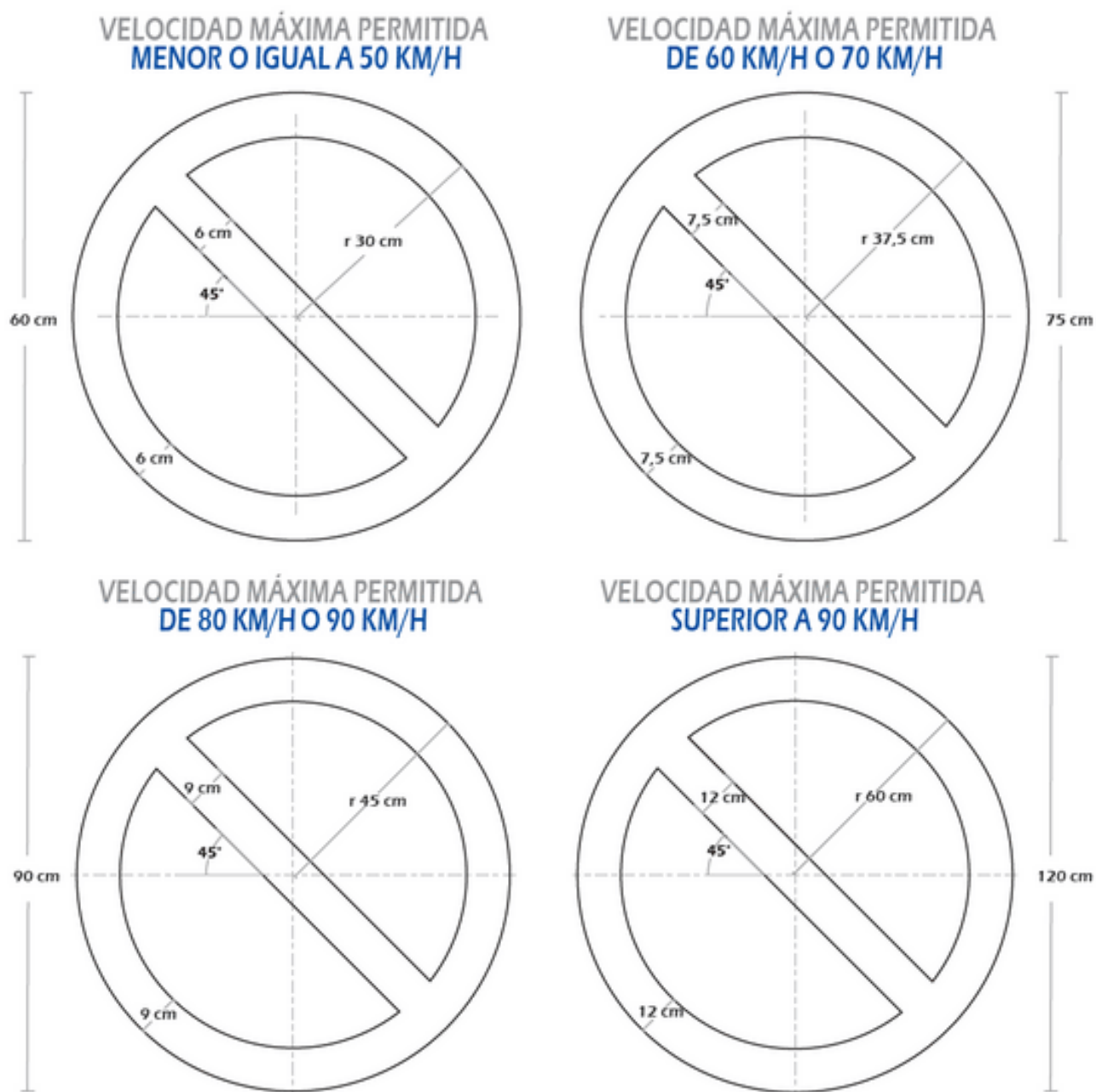


Ilustración 43 - Señal de prohibición estándar

SEÑALIZACIÓN DENTRO DEL TÚNEL

A lo largo de un túnel se deben demarcar los ejes y bordes del pavimento según los flujos de tránsito. Se deben aplicar demarcaciones planas y demarcaciones elevadas. Las demarcaciones elevadas se deben aplicar con un espaciamiento del 50% de una vía similar fuera de túnel. Adicionalmente, se deben colocar elementos captafaros en los muros del túnel, espaciados cada 8 a 12 metros, y a una elevación uniforme entre 50 y 90 cm sobre la superficie de rodadura.

Según el diseño de cada túnel, se deben utilizar señales viales para indicar las rutas de escape, tanto para personas como para vehículos, y las instalaciones de seguridad dentro de los túneles.

Se debe utilizar la señal para indicar a las personas que están dentro de un túnel cada acceso de salida directa por conexiones externas o por conexiones directas a otro tubo del túnel o a una galería de seguridad.

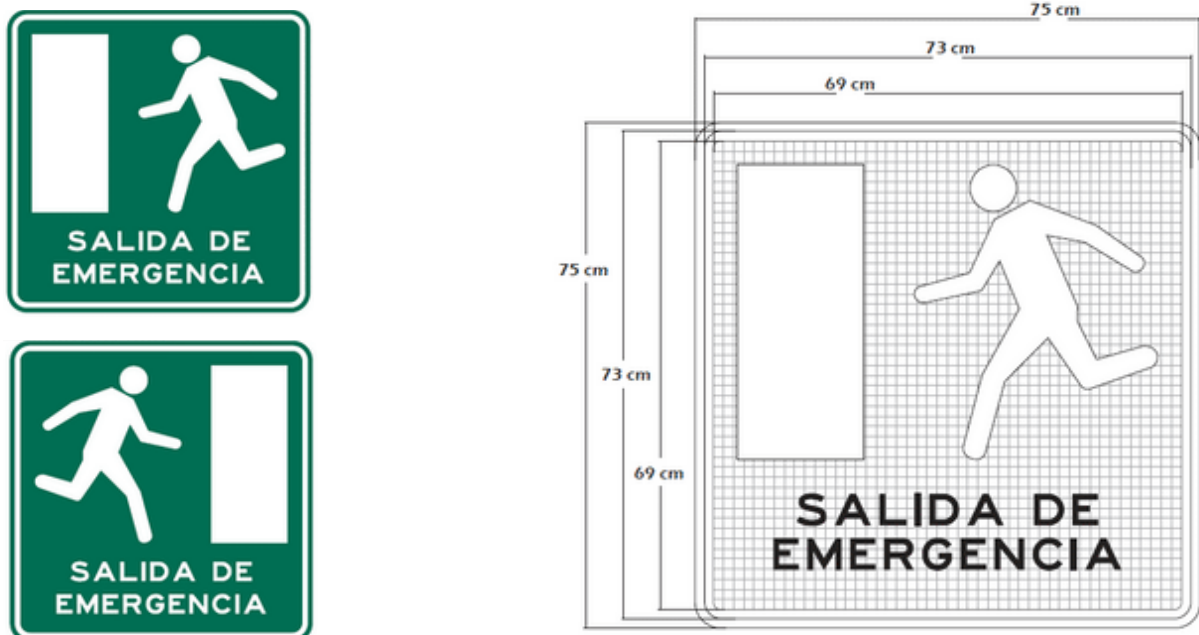
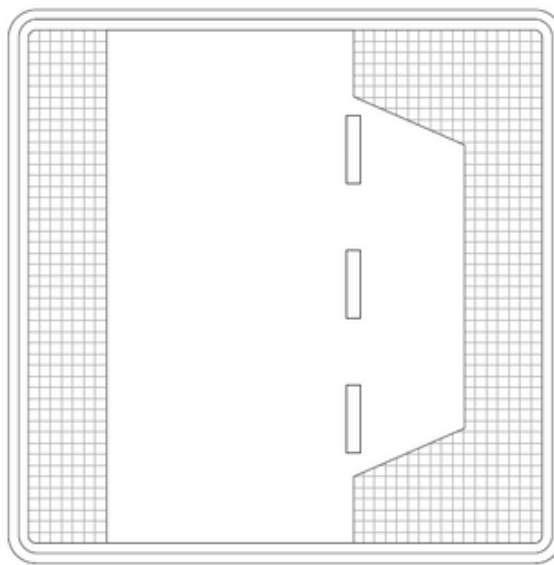


Ilustración 44 - Señal de salida de emergencia en túneles

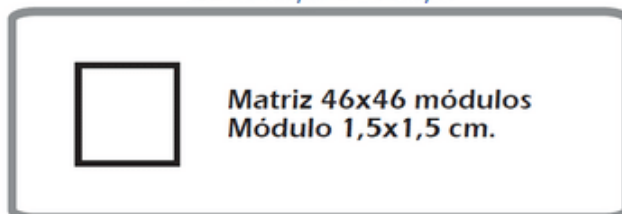
En túneles largos, se debe contar con bahías de estacionamiento debidamente señalizado, indicando su existencia. Se deberá acompañar de la señal y que indiquen la presencia de un teléfono de emergencia y extintores. Los muros de estos lugares se pueden pintar de verde para enfatizar que son parte de los elementos de seguridad vial.



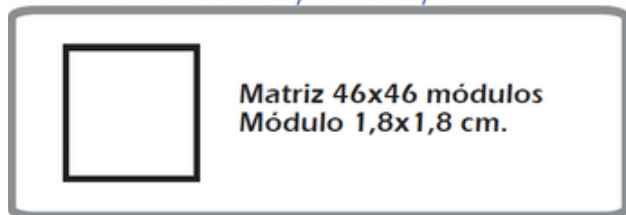
VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
MENOR O IGUAL A 50 KM/H



VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
DE 60 KM/H O 70 KM/H



VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
DE 80 KM/H O 90 KM/H



VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA
SUPERIOR A 90 KM/H

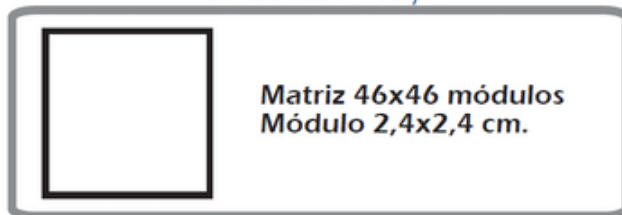


Ilustración 45 - Señal para las bahías de emergencia

Se debe informar mediante señales en cada nicho de auxilio o estación de seguridad la presencia de equipos disponibles tales como: TELÉFONO DE EMERGENCIA, EXTINTOR DE INCENDIOS, HIDRANTE Y MANGUERA PARA APAGAR INCENDIOS. Los nichos se deben colocar cada 150 m o menos.

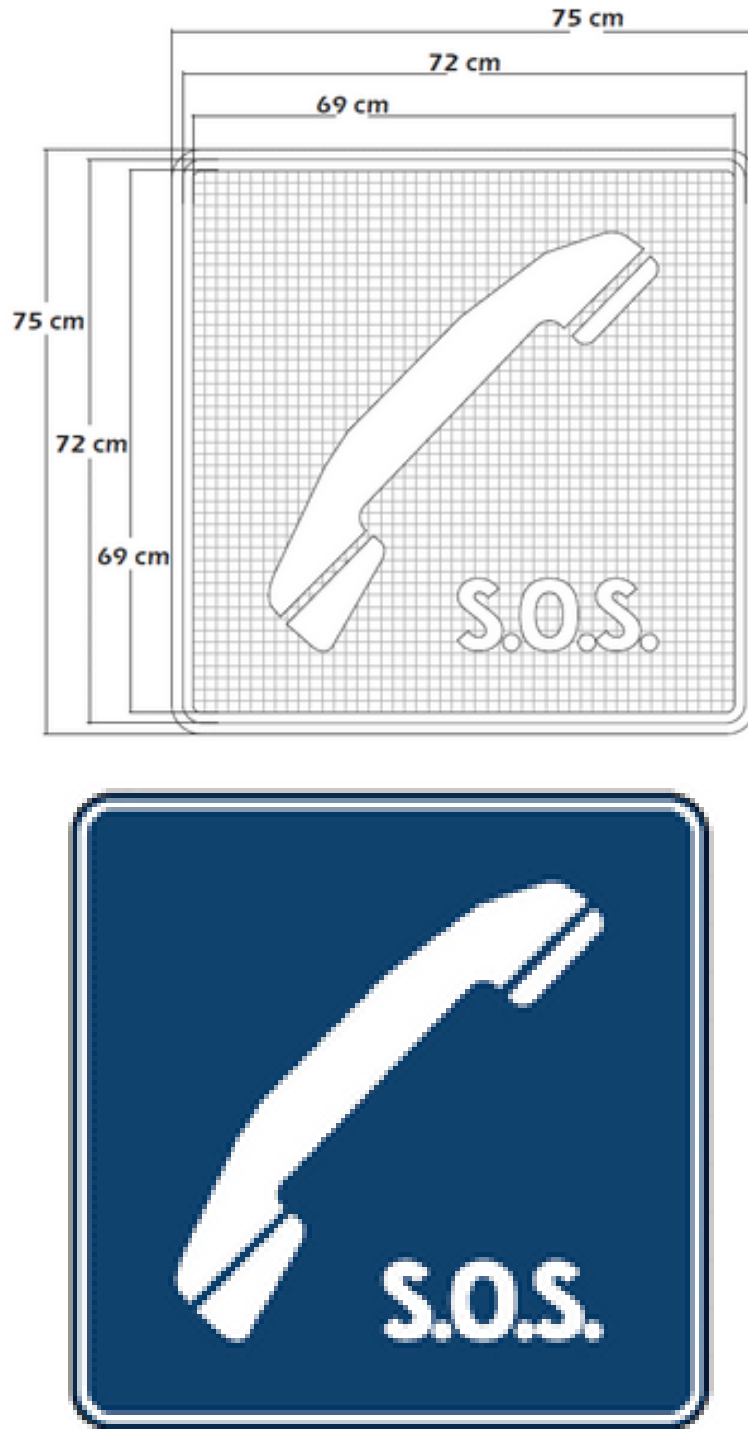


Ilustración 46 - Señal del telefono de emergencia

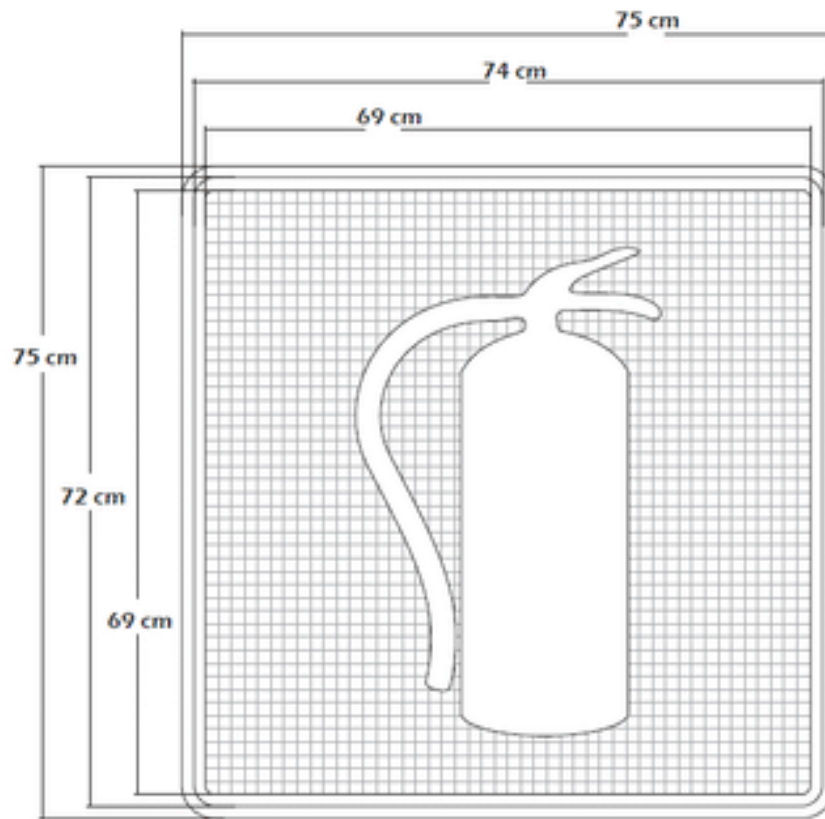


Ilustración 47 - Señal de ubicación del extintor

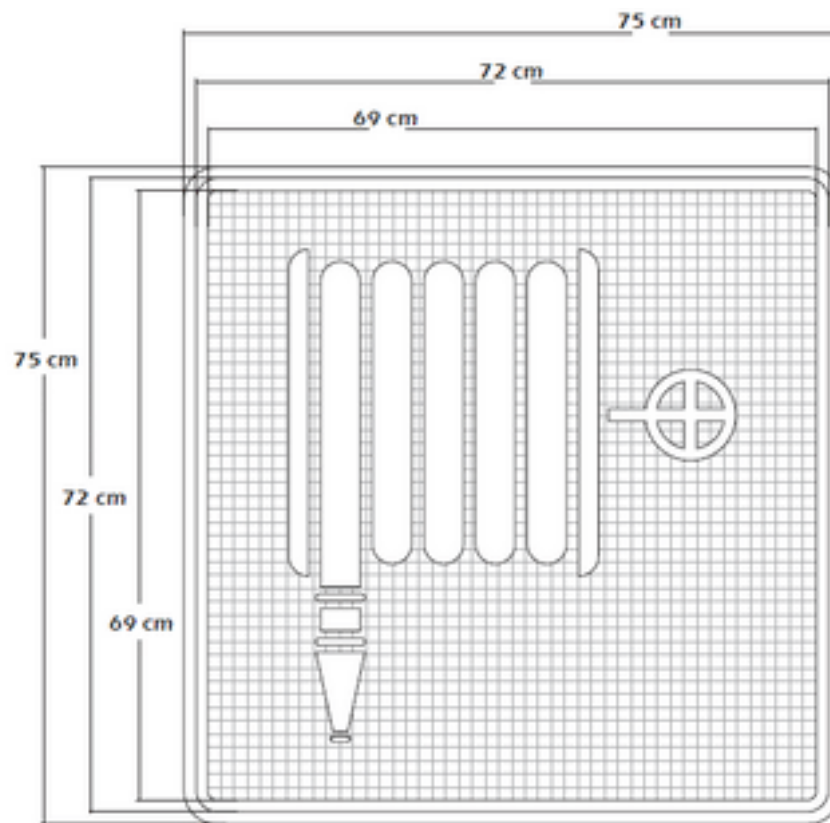


Ilustración 48 - Señal de ubicación de la manguera para incendios

SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL

Es el conjunto de marcas y dispositivos que se pintan o colocan sobre el pavimento, guarniciones y estructuras, dentro o adyacentes a la calzada con el propósito de delinear las características geométricas del túnel y denotar todos aquellos elementos estructurales que estén instalados, con el fin de regular y canalizar el tránsito de vehículos y peatones, así como proporcionar información a los usuarios. Estas marcas pueden ser rayas, símbolos, leyendas o dispositivos.

LINEAS LONGITUDINALES

Las líneas longitudinales se emplean para delimitar carriles y calzadas; para indicar zonas con y sin prohibición de adelantar o cambiar de carril; zonas con prohibición de estacionar; y para delimitar carriles de uso exclusivo de determinados tipos de vehículos, por ejemplo, carriles exclusivos de bicicletas, motocicletas o buses.

El color blanco se usa para indicar a los conductores:

- La separación de flujos que van en la misma dirección
- El costado derecho del pavimento en la dirección de flujo en vías de doble sentido de circulación
- El costado derecho e izquierdo del pavimento en la dirección del flujo en vías en un mismo sentido de circulación

El color amarillo se usa para indicar a los conductores:

- La separación entre flujos que van en sentido opuesto en vías de una sola calzada de dos sentidos
- El costado izquierdo en la dirección de flujo de calzadas con un sentido de circulación en vías de dos o más calzadas con separador y rampas de enlaces

El color azul se usa para demarcar las líneas de borde de pavimento en las aproximaciones y frente a hospitales, clínicas y centros de atención médica.

El color rojo se usa para indicar a los conductores:

- El acceso a una rampa de emergencia
- Carriles a los cuales no debe ingresarse desde la dirección en la cual son visibles
- En sardineles para indicar una prohibición de estacionamiento

A continuación se presenta el significado que tienen la forma y ancho de las líneas longitudinales:

- Una línea doble indica el máximo nivel de restricción o restricciones especiales
- Una línea continua significa que ningún conductor con su vehículo debe atravesarla ni circular sobre ella, y cuando la marca separe los dos sentidos de circulación, significa que no se debe circular por la izquierda de ella
- Una línea segmentada indica que está permitido su traspaso
- Una línea punteada advierte de una transición entre diferentes clases de líneas
- Línea normal: 12 a 15 cm de ancho y en ciclovías de 10 cm
- Línea ancha: tendrá un ancho por lo menos del doble de una línea normal
- Línea doble: son dos líneas paralelas claramente separadas
- Línea segmentada: es una línea normal separada por brechas
- Línea punteada: son segmentos claramente más cortos que los de una línea segmentada, separados por brechas también más cortas que las de la línea segmentada

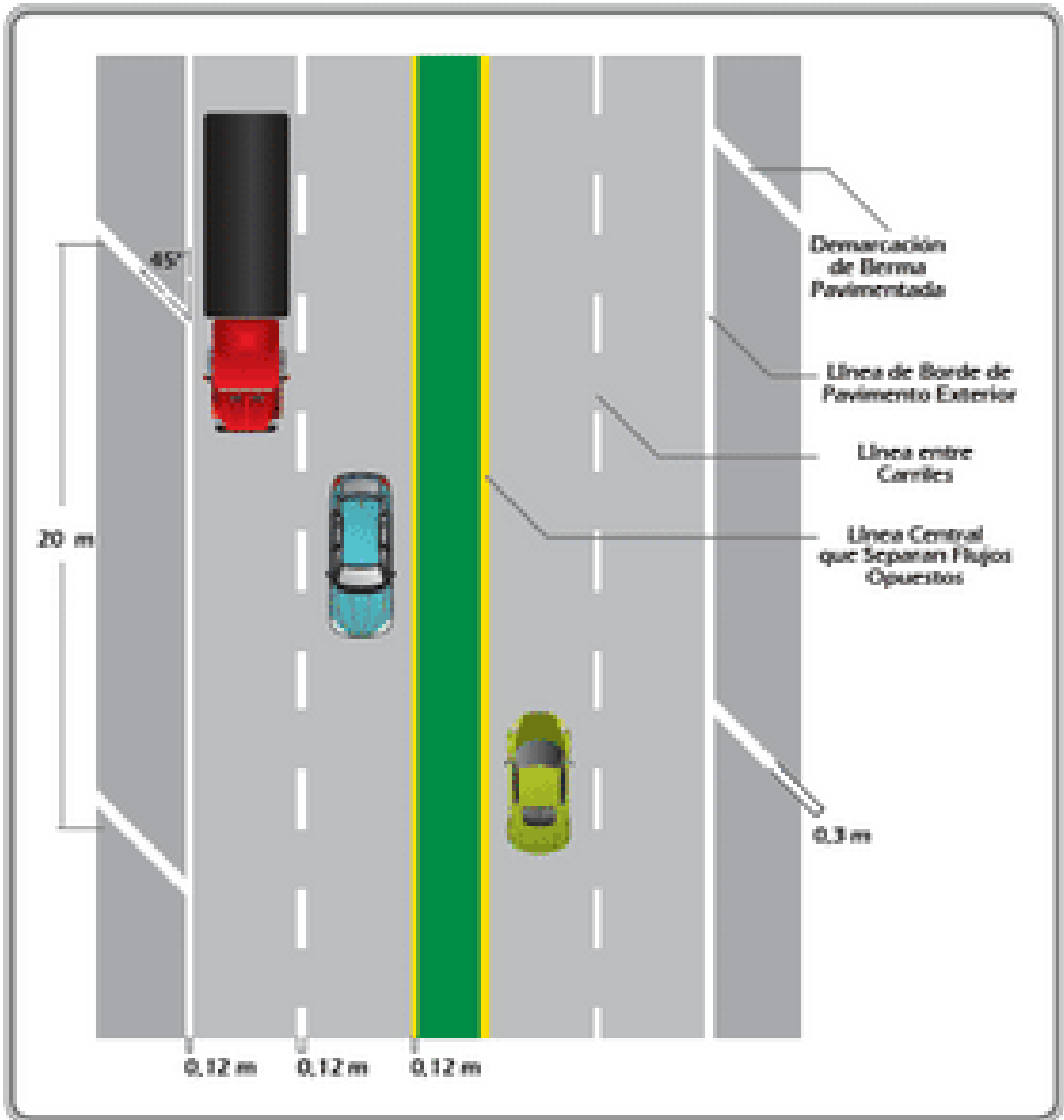


Ilustración 49 - Dimensiones de líneas longitudinales

08

CAPÍTULO 8

DRENAJE

DRENAJE INTERIOR

PG 126

DRENAJE EXTERIOR

PG 132

08

Los drenajes permiten eliminar las aguas a presión existentes dentro del macizo rocoso. El efecto más perjudicial del agua en el terreno es el de favorecer los deslizamientos de cuñas y bloques actuando en las juntas de la roca y disminuyendo la cohesión del relleno de estas. También se logra gracias a los drenajes concentrar en unos pocos puntos la entrada de agua al túnel. Los sistemas de drenaje se clasifican en superficiales y profundos; el drenaje superficial evita las infiltraciones en discontinuidades y sobre todo la erosión superficial, para lo cual se puede disponer de: cunetas perimetrales, zanjas de drenaje y otros.

DRENAJE INTERIOR

El sistema de drenaje longitudinal conduce el agua al exterior del túnel; el agua proviene principalmente de:

- Agua de la calzada, captada mediante bocas de tormenta colocadas en las banquetas
- Agua procedente de los afloramientos y de las filtraciones del terreno y que es encauzada mediante el sistema de impermeabilización del túnel
- Agua que circula por las cunetas y entra al túnel al no poder evacuarse por otros lados

Los diámetros de los drenes laterales y el colector o los colectores principales serán determinados en la etapa de proyecto tomando en cuenta el caudal esperado.

La separación mínima entre bajadas al colector principal será de 5.0 m entre una y otra. En todos los casos los drenes, colectores, bajadas y conexiones serán de polietileno de alta densidad corrugado de pared sencilla, que cumplan con Clase II debido a su gran resistencia y a que se adaptan a cualquier condición geométrica del túnel.

Para determinar la ubicación, el número de drenes y las bajadas al colector (o colectores) principal (es) se deberá tomar en cuenta el alineamiento horizontal y vertical del túnel.

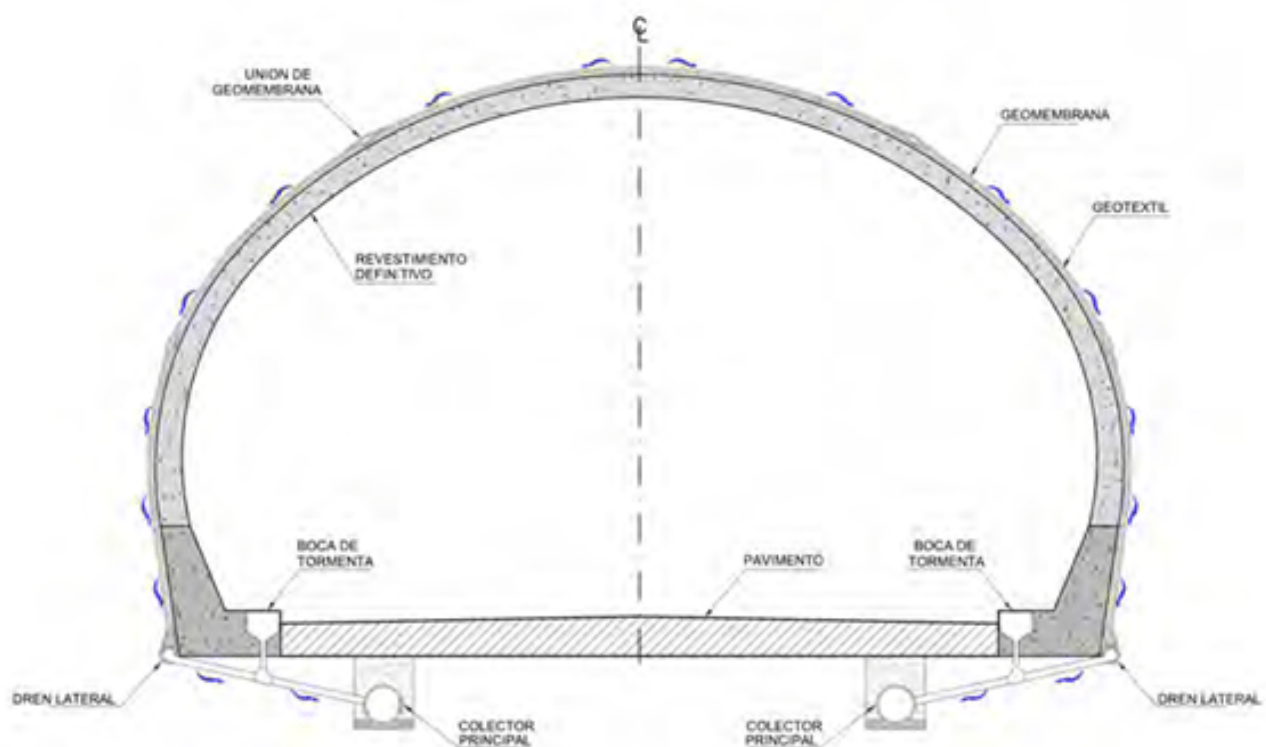


Ilustración 50 - Sección semicircular con drenaje interior

POZOS DE VISITA

Los pozos de visita podrán ser prefabricados de concreto o de concreto hidráulico con acero de refuerzo; la losa de la parte superior de los pozos puede ser prefabricada o construida en el lugar, su espesor y tapa deberán ser suficientes para soportar el tráfico pesado del túnel; en todos los casos deberá de adaptarse a las condiciones finales del pavimento.



Ilustración 51 - Pozo de visita en planta



Ilustración 52 - Pozo de visita vista transversal

La separación máxima entre pozos de visita, debe ser la adecuada para facilitar las operaciones de inspección y limpieza. De acuerdo a las normas para obras de alcantarillado sanitario y pluvial se recomiendan las siguientes distancias:

- En tubos de 0.20 a 0.61 m de diámetro, la distancia recomendable de separación es 125 m
- En tubos de 0.76 a 1.22 m de diámetro, la distancia recomendable de separación es 150 m
- En tubos de 1.52 a 2.44 m de diámetro, la distancia recomendable de separación es 175 m

La tapa deberá ser hermética y fabricada de un material capaz de resistir las cargas puntuales máximas esperadas durante la vida útil del túnel.

BOCAS DE TORMENTA

Independientemente que el sistema de impermeabilización debe mantener el interior del túnel libre de agua; es necesario colocar bocas de tormenta en la zona de las banquetas del túnel para recoger el agua producto de la limpieza de la calzada por el derrame de residuos tóxicos, combustibles, aceites etc. Estas estructuras de captación deberán conducir el agua hasta el colector principal más cercano y deberán estar provista de una tapa para realizar el mantenimiento periódico.

Las bocas de tormenta deberán colocarse a cada 50m ubicadas del lado bajo de la calzada; en una sección en tangente se podrán colocar dos bocas de tormenta.

Las bocas de tormenta pueden ser de fierro fundido o de polietileno siempre y cuando cumplan con las dimensiones, características y calidad establecidas en el proyecto ejecutivo.

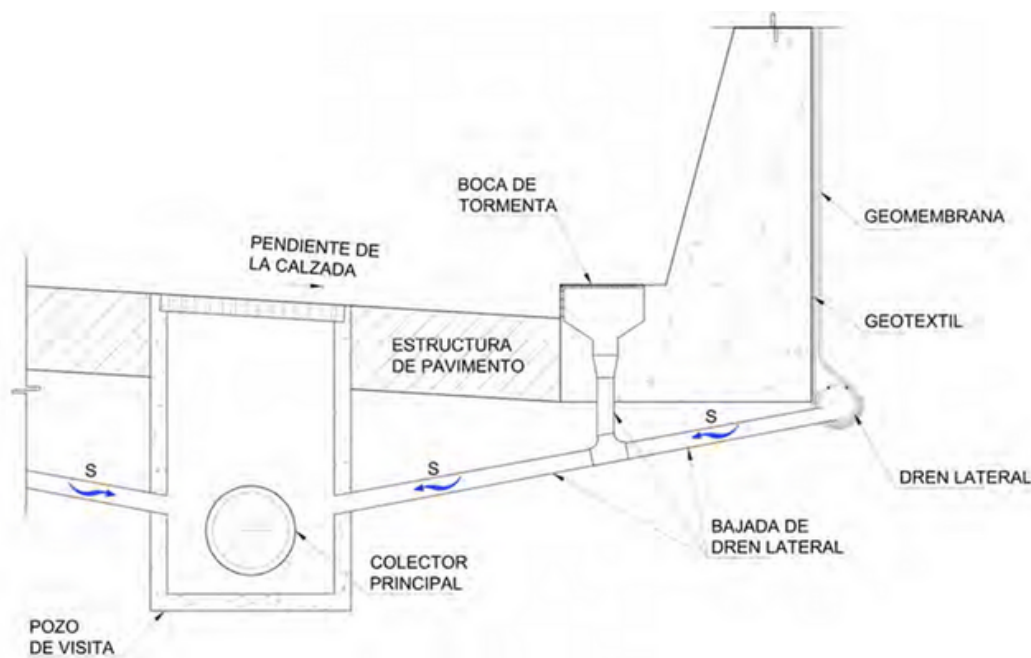


Ilustración 53 - Boca de tormenta conectado al pozo de visita

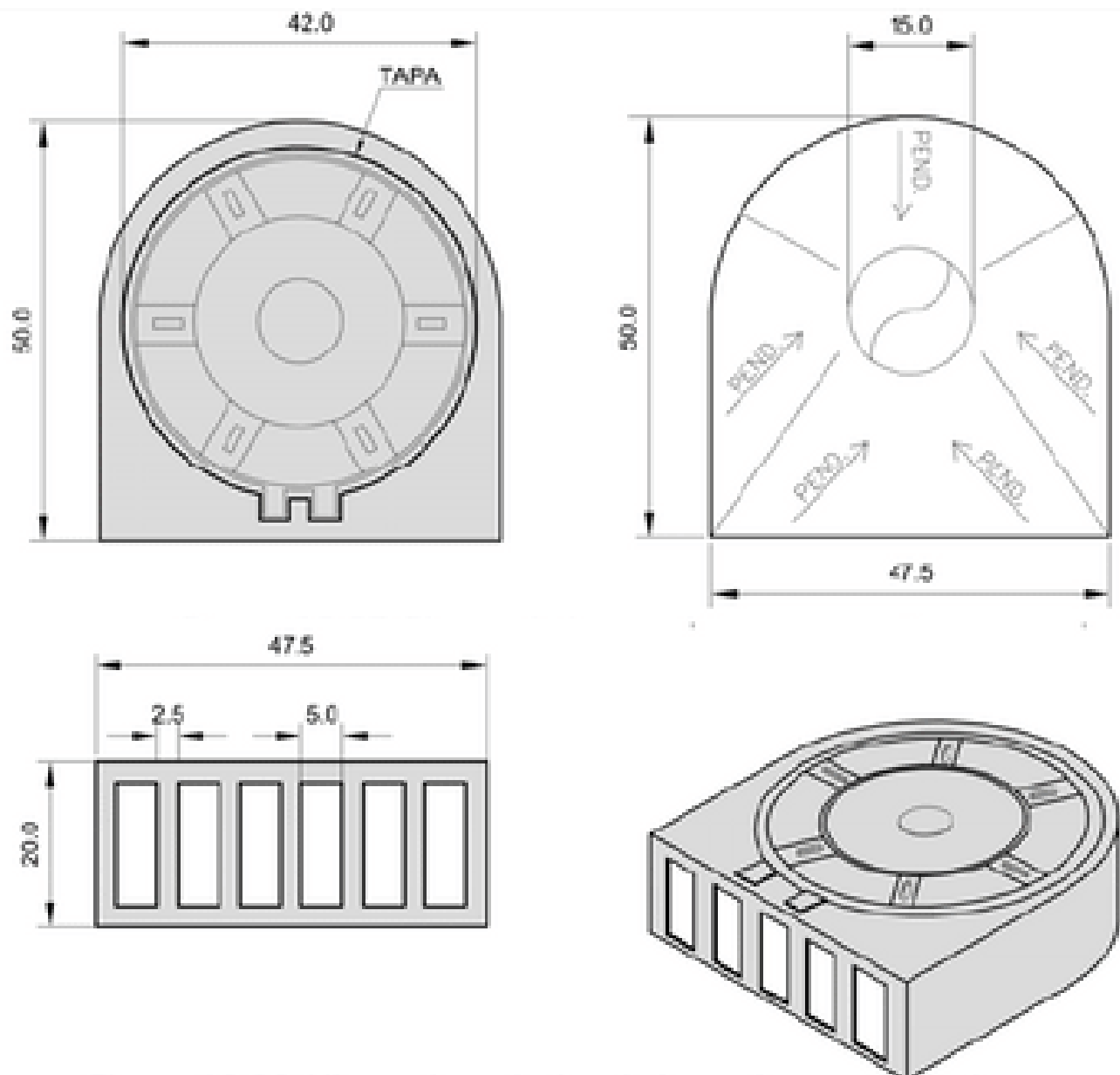


Ilustración 54 - Boca de tormenta dimensiones

DRENAJE EXTERIOR

El drenaje exterior en túneles es el conjunto de obras complementarias que contribuyen a encauzar las aguas superficiales fuera de la zona de taludes y así evitar serios daños por problemas de estabilidad.

Para lograr un sistema de drenaje efectivo se requiere tomar en cuenta la geología de la zona, la topografía, el clima y la hidrología; ya que el objetivo básico para una obra de drenaje es la preservación de la vía; es así como la ubicación y el diseño de las obras de drenaje tendrá una gran importancia en el proyecto del túnel.

CUNETAS

La pendiente longitudinal mínima que debe existir en una cuneta es de 0.5%, regularmente será coincidente con la pendiente adoptada por la vía.

Las cunetas se construyen generalmente en sección trapezoidal o triangular siendo la sección triangular la más frecuente, el talud hacia la vía es como mínimo 3:1 y del lado del corte sigue sensiblemente la inclinación natural del talud. La sección triangular es la más conveniente y fácil de construir, se conforma al terminar la capa subrasante.

Las cunetas deberán ser de concreto reforzado con malla electrosoldada de 10 cm de espesor; la resistencia del concreto y el tipo de armado serán definidos en la etapa de proyecto tomando en cuenta las necesidades específicas de cada proyecto.

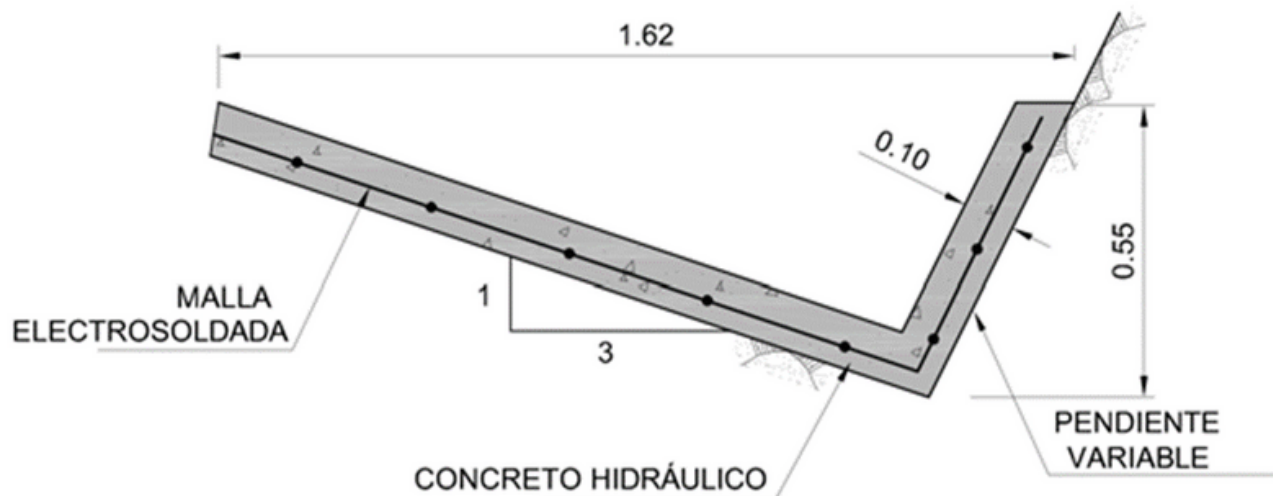


Ilustración 55 - Sección típica de cuneta

CONTRACUNETAS

Las contracunetas son zanjas que se construyen en la laderas localizadas aguas arriba de los taludes de los cortes o cerca de estos con el objetivo de interceptar el agua que escurre sobre la superficie del terreno natural, conduciéndola a una cañada inmediata a una parte baja del terreno para evitar el saturamiento hidráulico de la cuneta y el deslave o erosión del corte.

La contracuneta se construye a una distancia variable del coronamiento del corte de tal manera que no quede un área susceptible de generar escurrimientos no controlados de importancia.

El desarrollo de la contracuneta debe ser sensiblemente paralelo al propio corte, de esta manera el canal se va desarrollando con pendiente longitudinal, la cuneta debe conducir el agua captada a cañadas o cauces naturales, o ligarse a otra obra de drenaje (Lavaderos).

Las contracunetas deberán ser de concreto reforzado; el espesor, la resistencia del concreto, el tipo de armado y la capacidad hidráulica de la sección serán definidos en la etapa de proyecto tomando en cuenta las necesidades específicas de cada proyecto.

El criterio para definir la construcción de una contracuneta deberá basarse en consideraciones topográficas y de la naturaleza de los materiales que forman los cortes, los taludes y el terreno natural de la zona; el levantamiento topográfico definirá en mucho los escurrimientos que se deberán esperar sobre el talud.

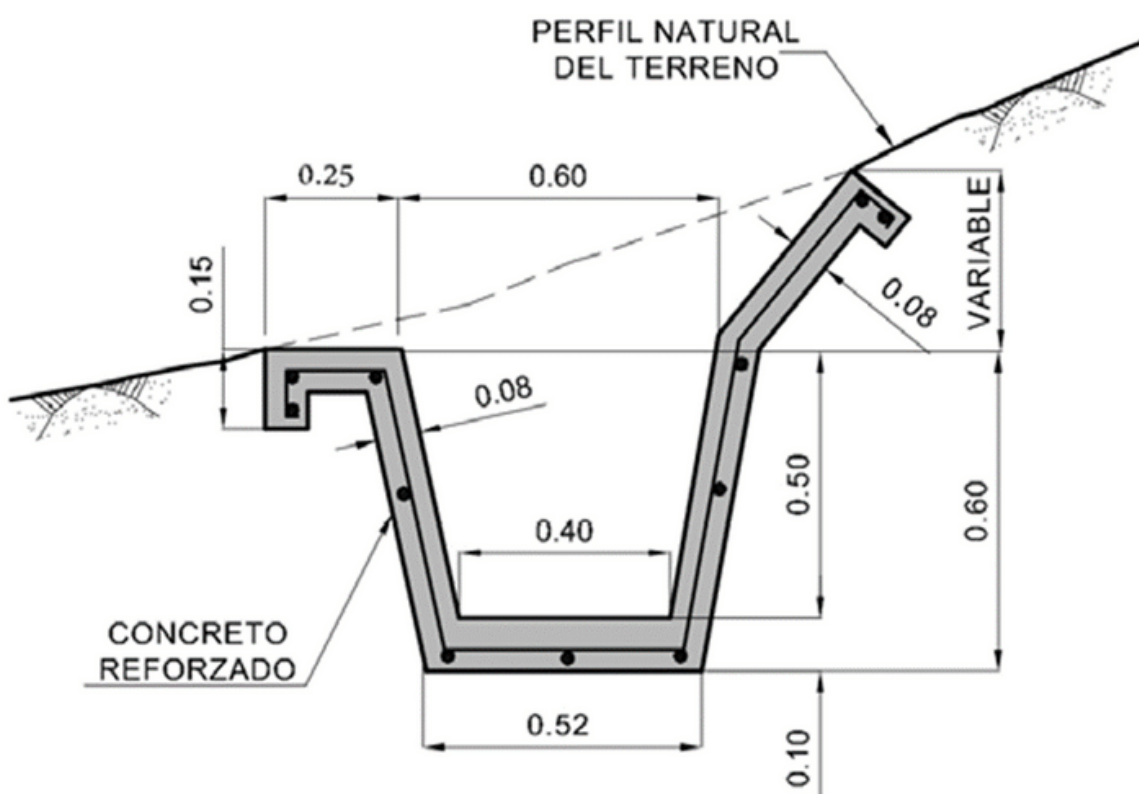


Ilustración 56 - Sección típica de contracuneta

09

CAPÍTULO 9

ILUMINACIÓN

DEFINICIONES	PG 137
CLASIFICACIÓN DE TÚNELES	PG 138
ALUMBRADO	PG 139
METODOS PARA DETERMINAR LA LUMINANCIA	PG 144
EJEMPLO DE DISEÑO	PG 153

09

La iluminación en un túnel busca conseguir los niveles suficientes que garanticen la visibilidad, seguridad y fluidez, de forma que el conductor sea capaz de distinguir el trazo del túnel y los obstáculos que pudiera encontrar en él, atendiendo también a la economía de la solución encontrada.

Los requerimientos de iluminación en un túnel son completamente distintos durante el día y durante la noche. Durante la noche el problema es relativamente simple y consiste en suministrar unos niveles de luminancia en el interior del túnel al menos iguales a los que existen en el exterior del túnel.

Sin embargo, el diseño de la iluminación durante el día es particularmente crítica debido al sistema visual humano. El conductor en el exterior del túnel no puede percibir simultáneamente detalles en la carretera cuando en el exterior hay altos niveles de iluminación y en el interior está relativamente oscuro. Es decir, durante el día los niveles de luminosidad externa son altos y el ojo debe pasar a la escasa iluminación del interior del túnel sufriendo un proceso de adaptación. La visión depende principalmente de la longitud del túnel, pero también de otros parámetros como el ancho, altura, gálibos verticales y horizontales (alineamiento y curvatura).

La mayor problemática se da cuando el sistema visual se adapta a una reducción de la iluminación ambiente, como cuando se pasa de la luz del día a las condiciones de baja iluminación de un túnel, dado que el proceso de ajuste no es instantáneo, sino que toma un cierto tiempo.

DEFINICIONES

Los principales términos empleados en el campo de la ingeniería son los siguientes: (NORMA UNE - CR_14380:2007)

- **Candela por metro cuadrado:** Unidad de luminosidad fotométrica del S.I. Una superficie perfectamente difuminada de luz emitida o reflejada en el rango de un lumen por metro cuadrado.
- **Candela:** Unidad de intensidad luminosa en el S.I. de unidades. Una candela (cd) es un lumen por metro cuadrado.
- **Deslumbramiento:** Sensación producida por la luminosidad del campo visual que es más intensa que la luminosidad a la cual los ojos se adaptan, causando molestias o pérdidas de la capacidad visual.
- **Distancia mínima de seguridad de frenado:** Es la distancia necesaria para llevar a un vehículo, conducido de la velocidad de diseño a un alto total. Suele estar definida en la NOM-001-SEDE.
- **Lumen:** Unidad de medida de cuantificación de luz. Es la cantidad de luz que incide en un área de 1 pie², cada punto de los cuales está a 1 pie de una fuente de una candela.
- **Luminosidad:** Flujo luminoso por unidad de área proyectada y unidad de ángulo sólido.
- **Lux:** Iluminación que incide en una superficie de un metro cuadrado de área en el que se distribuye una potencia de luz uniforme de un lumen (lumen/m²).
- **Parpadeo:** Resultado del cambio periódico de luminancia en el campo de visión, debido al espaciado entre los accesorios de iluminación.
- **Punto de adaptación:** Punto de la carretera donde la adaptación del ojo de un conductor aproximándose a un túnel comienza a ser influenciada por la presencia de la obscura entrada del mismo.

CLASIFICACIÓN DE TÚNELES

Antes de abordar el tema de las instalaciones de alumbrado y sistemas especiales de un túnel se debe hacer un pequeño análisis de los tipos de túneles de carretera:

- **Túneles de nivel III:** Túneles cortos o de poco tráfico que no requieren de ningún tipo de instalaciones específicas.
- **Túneles nivel II:** Túneles que van a exigir un cierto tipo de instalaciones y de vigilancia particular con respecto al resto de trazado donde están inscritos (túneles de montaña y mediana longitud).
- **Túneles nivel I:** Túneles en los que por sus condiciones especiales van a necesitar una organización específica permanente para el control y vigilancia de sus instalaciones (túneles de autopista, urbanos, etc.).

Los túneles se clasifican según su longitud y para fines de alumbrado y sistemas de seguridad, en túneles cortos, medianos y largos.

- **Túneles cortos:** Es el túnel recto cuya longitud total de un extremo a otro, a lo largo de su eje central, es igual o menor que la distancia mínima de seguridad de frenado. Un túnel corto puede tener hasta 25 metros de largo, sin que necesite alumbrado durante el día, siempre que sea recto o el tráfico no sea muy intenso.
- **Túneles medianos:** Con longitud mayor o igual a la distancia mínima de seguridad de frenado y menor de 400 metros.
- **Túneles largos:** Es un túnel cuya longitud total es mayor que la distancia mínima de seguridad de frenado, o bien, aquel que por su alineación o curvatura impida observar al conductor la salida del mismo. En los túneles largos necesariamente existen zona de umbral, transición, interior y salida. Túneles con longitud mayor a 400 metros.

ALUMBRADO

ZONA DE ENTRADA O UMBRAL

El conductor que se acerca a la entrada de un túnel durante el día ha de adaptar sus ojos del alto nivel de luminancia que prevalece en el exterior a la luminancia del interior. Por consiguiente, si el túnel es largo y el nivel de luminancia dentro de él es mucho más bajo que el de fuera, el túnel se presenta como un hueco "negro", por lo que no será visible ningún detalle de su interior.



Ilustración 57 - Efecto de "agujero negro" en la entrada de un túnel largo

Para hacer visibles los obstáculos dentro del túnel hay que aumentar el nivel de luminancia de su entrada, esto es, en la zona de umbral. El nivel de luminancia requerido en esta zona depende de la denominada "luminancia externa de adaptación", que es función a su vez de la magnitud y distribución de las luminancias exteriores del túnel.

Para la mayoría de los tipos de túnel se puede tomar medidas especiales para bajar la luminancia externa de adaptación. Tales medidas incluyen el empleo de materiales oscuros no reflectivos para la superficie de la calzada en la zona cercana al túnel, para la fachada de la entrada del túnel y (para túneles submarinos) las paredes en la cortadura de acceso; plantar árboles o arbustos al lado y encima de la entrada para protegerla del brillante cielo, y hacer la propia entrada al túnel tan alta y ancha como sea posible.

En la práctica, la máxima luminancia externa de adaptación que se observa (que corresponde a una iluminancia horizontal de alrededor de 100.000 lux) varía, de acuerdo con el tipo de túnel y las medidas tomadas, entre 3.000 cd/m² y más de 8.000 cd/m². La forma en que está relacionada la luminancia externa de adaptación con la luminancia necesaria en la zona de umbral se muestra en la Fig.33. De esta figura se puede deducir que la luminancia de la zona umbral debe ser como mínimo el 10 % del valor externo para el grado de visibilidad de objetos que se considera en la figura.

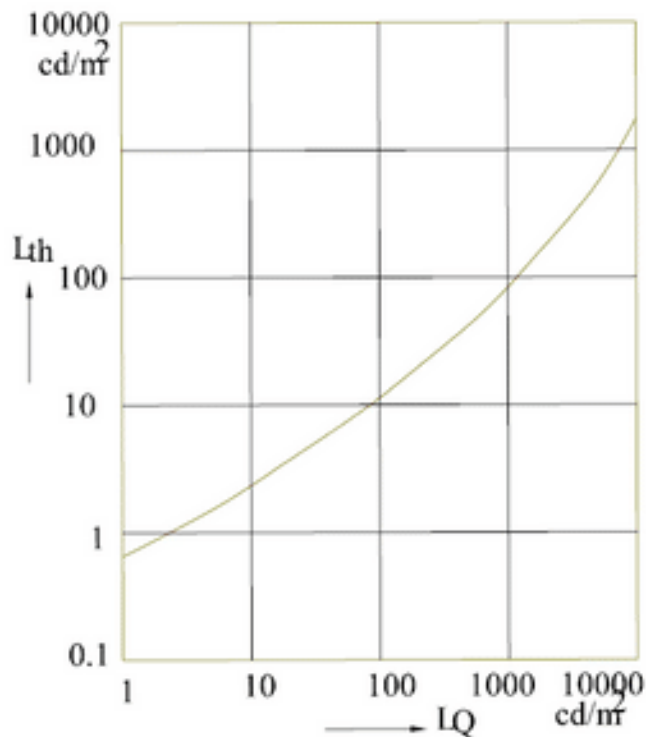


Ilustración 58 - Relación entre la luminancia externa (Lo) y la de la zona de umbral (Lth)

La longitud de la zona umbral depende principalmente de la distancia a la cual deba ser visible un objeto crítico, lo que depende de la velocidad permitida dentro del túnel. En la práctica, la longitud de la zona de umbral es de 40 a 80 metros para velocidades entre 50 y 100 km/h.

El alto nivel de alumbrado en la zona de umbral puede obtenerse por la iluminación artificial interna del túnel. Alternativamente se puede crear artificialmente una zona de umbral delante de la entrada al túnel con la iluminación adecuada mediante el uso de paralúmenes (paneles o estructuras traslúcidas) que controlen la luz diurna que llega a la calzada, lográndose así el nivel de luminancia deseado.

Tales paralúmenes (paneles o estructuras traslúcidas) deben construirse de manera que sea imposible a la luz directa del sol alcanzar la superficie de la calzada o los ojos del conductor con el fin de evitar sombras molestas sobre la calzada o parpadeo incómodo.

Un grave inconveniente de los paralúmenes es que su transmitancia varía con las condiciones luminosas del cielo, aparte de estar frecuentemente influenciada por el ensuciamiento.

ZONA DE TRANSICIÓN

El conductor que entra en un túnel necesita cierto tiempo para que sus ojos se adapten a un nivel inferior de luminancia. Por consiguiente, es preciso que la transición del nivel más alto al más bajo reinante en el túnel se haga gradualmente. Los ensayos realizados han demostrado que un 75 % de los conductores consideran aceptable un período de aproximadamente 15 segundos para una transición de 8.0 cd/m² (luminancia de la luz diurna) a 15 cd/m² (luminancia en la zona central del túnel), como se denota en la ilustración 59.

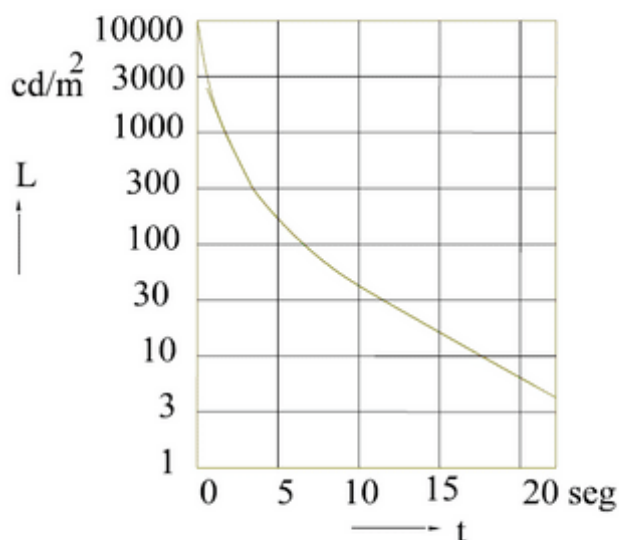


Ilustración 59 - Relación entre tiempo de adaptación (t) y luminancia (L)

ZONA DE CENTRAL

En túneles largos, a la zona de transición (o de adaptación) sigue otra en la que el nivel de luminancia se mantiene constante. En esta zona, la central, la adaptación no está forzosamente terminada y es necesario disponer en ella de un nivel de luminancia lo suficientemente elevado. La experiencia lograda en túneles existentes y en maquetas revela que un mínimo de 15 cd/m² es recomendable para la luminancia media de las calzadas en esta zona. Para túneles muy largos o con un límite de velocidad muy bajo es aceptable una luminancia de 5 a 10 cd/m².

ZONA DE SALIDA

Durante el día, la salida de un túnel se presenta al conductor que se encuentra dentro como un agujero brillante contra el cual los obstáculos son claramente visibles en silueta. Este efecto de silueta puede acentuarse dando a las paredes una alta reflectancia. Puesto que la adaptación de un nivel bajo de luminancia a otro mayor se efectúa rápidamente, las exigencias de la iluminación de la zona de salida son mucho menos severas que las de la zona de entrada.

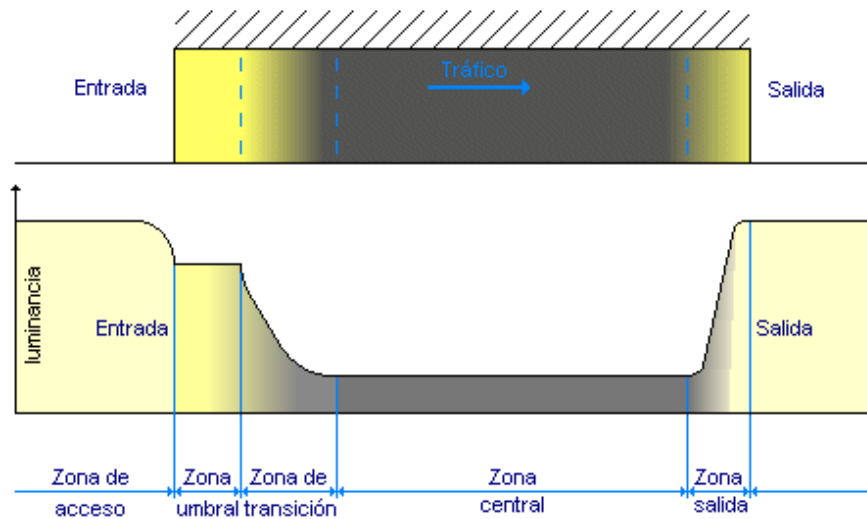


Ilustración 60 - Sección longitudinal de un túnel largo

DISTANCIA MÍNIMA DE SEGURIDAD DE FRENADO (DMSF)

Es la distancia necesaria para que el conductor de un vehículo que circula a determinada velocidad, pueda detenerse antes de alcanzar a un obstáculo situado en la calzada. Dicha distancia consta de dos sumandos: el recorrido del vehículo desde el instante en que el conductor divisa el obstáculo hasta que aplica los frenos, y la distancia de frenado propiamente dicha.

Velocidad del Tráfico Km/h	DMSF (m)
50	80
65	90
80	140
90	165
95	200
105	220

Tabla 14 - DMSF según la velocidad del tráfico (diseño)

METODOS PARA DETERMINAR LA LUMINANCIA

Se establecen todos los aspectos más importantes con relación al modo de resolver la problemática de visión de los túneles, indicando los criterios de calidad y la forma de cumplirlos en las distintas situaciones que se pueden plantear en un túnel.

Está principalmente basada en la Publicación CIE No. 88:1990, e incorpora algunos métodos de países particulares para la determinación de algunos de los criterios a satisfacer. Siendo una de las contribuciones mayores la ayuda a la toma de decisión de la iluminación de túneles cortos, empleando el método del cálculo de la visión a través, potencia tiempo limitado (LTP).

Métodos para la determinación de la luminancia de acceso L20:

- Método aproximado
- Método más exacto

En éste método se incluyen una serie de tablas basadas en la obtención de distintas clases de túnel en función de la intensidad de tráfico y de la composición del mismo para poder calcular:

- La Lth a partir de la L20.
- La luminancia en la zona interior del túnel así como por el guiado visual.
- La zona de salida.
- Las uniformidades de luminancia.
- El alumbrado nocturno.

METODO MAS EXACTO

Debe usarse siempre que exista una vista tridimensional del portal. En este método, la evaluación de L20 se obtiene a partir de un croquis de los alrededores de la entrada del túnel y se calcula mediante la fórmula:

$$L20 = \gamma * LC + \rho * LR + \epsilon * LE + t * Lth$$

Donde:

- LC es la luminancia de cielo: γ = % de cielo.
- LR es la luminancia de calzada: ρ = % de calzada.
- LE es la luminancia del entorno: ϵ = % de entorno.
- Lth es la luminancia de zona de umbral: t = % de portal.

Con:

$$\gamma + \rho + \epsilon + t = 1$$

En esta fórmula el valor de Lth es la incógnita a determinar. Para distancias mínimas de seguridad de frenado superiores a 100 metros el valor t es bajo (menor del 10%) y como Lth es ya bajo con respecto a los otros valores de luminancia, puede despreciarse la contribución de Lth.

Para una distancia mínima de seguridad de frenado de 60 metros, se puede escribir:

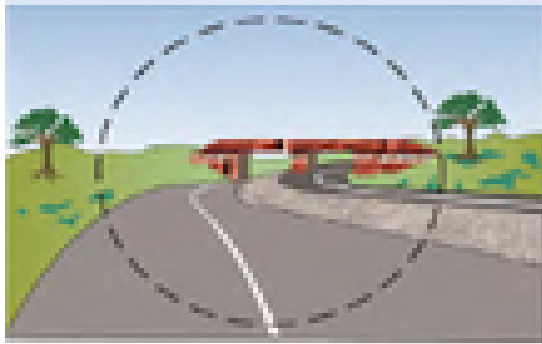
$$L20 = (\gamma * LC + \rho * LR + \epsilon * LE) / (1 - t * k)$$

Como k nunca excede de 0.1, se obtiene:

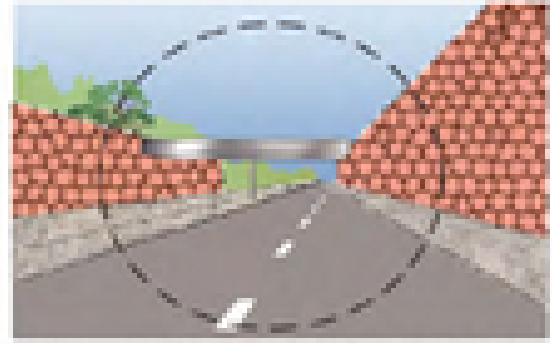
$$L20 = \gamma * LC + \rho * LR + \epsilon * LE$$

Con:

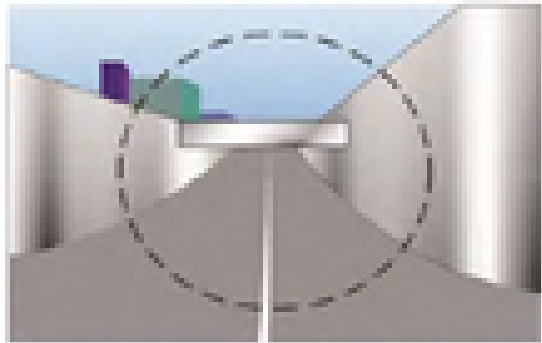
$$\gamma + \rho + \epsilon < 1$$



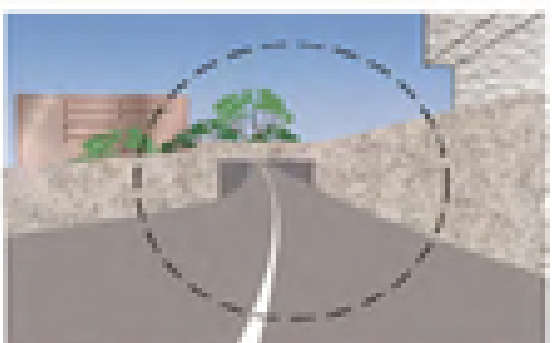
1.-Distancia de seguridad 100 m, Cielo 35%



2.-Distancia de seguridad 100 m, Cielo 27%



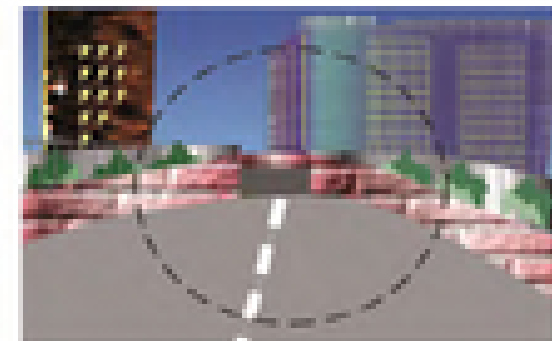
3.-Distancia de seguridad 60 m, Cielo 14%



4.-Distancia de seguridad 100 m, Cielo 18%



5.-Distancia de seguridad 100 m, Cielo 14%



6.-Distancia de seguridad 100 m, Cielo 3%



7.-Distancia de seguridad 100 m, Cielo 13%



8.-Distancia de seguridad 100 m, Cielo 4%

Ilustración 61 - Luminancia de la zona de acceso (L20) para ciertas situaciones

Si los valores de luminancia de los alrededores locales no están disponibles, los datos para LC, LR, LE (expresados en kcd/m²) pueden tomarse de la siguiente tabla:

Sentido de circulación	L _c (kcd/m ²) cielo	L _R (kcd/m ²) carretera	L _E (kcd/m) ² entorno			
			Rocas	Edificios	Nieve	Vegetación
N	8	3	3	8	15 (V) 15 (H)	2
E – O	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

Tabla 16 - Valores típicos de LC LR y LE expresados en kcd/m²

(V) Paisaje montañoso con muchos obstáculos visuales verticales

(H) Paisaje llano, más o menos horizontal

Nota: en el hemisferio sur N y S serían intercambiables.

El valor L₂₀ obtenido por este método es un valor máximo y puede estar sobreestimado debido a que en los portales de los túneles, los valores máximos para los tres componentes de calzada, cielo y alrededores no suelen ocurrir simultáneamente en el mismo momento del día.

Además no hay disponible ninguna información sobre la frecuencia de estos valores durante el año y la seguridad correspondiente de la instalación a partir de este único valor L₂₀.

CLASES DE TÚNELES

El método de la clase de túnel está basado en las características del uso del túnel y no en la visibilidad de objetos. Puede aplicarse cuando se utiliza el método de L20. La clasificación está basada en los principales factores de influencia:

- Intensidad de tráfico.
- Tipo de tráfico.
- Guiado visual.

Para la intensidad de tráfico se consideran los tres niveles que se reflejan en la siguiente tabla:

Intensidad de tráfico	Tráfico unidireccional (vehículo/hora.carril)	Tráfico bidireccional (vehículo/hora.carril)
Alta	>1500	>400
Media	500 - 1500	100 - 400
Baja	<500	<100

Tabla 17 - Intensidad de tráfico

En cuanto a tipo y composición del tráfico se consideran los dos tipos siguientes:

- A.** Sólo tráfico motorizado.
- M.** Tráfico mixto incluyendo bicicletas.

Para túneles en los que la intensidad de tráfico es baja ($IMD < 1000$) y el tráfico del túnel es del tipo A, tan solo se considera necesario un guiado visual, ya que en este caso no está justificado el alumbrado del túnel "completo". En función de la intensidad y tipo de tráfico fijados anteriormente, se establece en la tabla siguiente las cuatro fases de alumbrado de túneles.

Intensidad de tráfico	Alta		Media		Baja	
Tipo de tráfico	M	A	M	A	M	A
Clase de túnel	4	3	3	2	2	1 (guiado)

Tabla 18 - Clases de alumbrado de túneles

DETERMINACION DE LA LUMINANCIA DE UMBRAL (LTH)

En la tabla 19, figuran los distintos valores asignado a la relación entre Lth y L20 ($k=Lth/L20$) para que las condiciones de visión sean adecuadas. Dicho coeficiente k recibe el nombre de poder revelador y depende de la distancia mínima de frenado y de la clase de túnel.

Clase de túnel	DMSF* (m)		
	≤ 60 km/hr	100 km/hr	≥ 160 km/hr
4	k=0.05	k=0.06	k=0.1
3	k=0.04	k=0.05	k=0.07
2	k=0.03	k=0.04	k=0.05
1	No hay requisitos (solamente orientación al alumbrado)		

*Calculada para pavimento húmedo

Tabla 19 - Valores recomendados de k tomando en cuenta la clase de túnel y su DMSF

Es importante poner atención al usar valores bajos de k en los sistemas de alumbrado a contraflujo. Al aceptar niveles bajos de Lth hay un incremento en el efecto de agujero negro comparado con el valor de Lth similar obtenido en sistemas de alumbrado simétricos. Aun así, los sistemas de alumbrado a contraflujo crean mayores contrastes entre objetos pequeños y el fondo (superficie de la carretera).

LONGITUD DE LA ZONA DE UMBRAL Y DE TRANSICIÓN

La longitud total de la zona de umbral debe ser al menos igual a la distancia mínima de frenado.

Durante la primera mitad de la distancia, el nivel de luminancia debe ser igual a L_{th} (el valor al comienzo de la zona de umbral). A partir de la mitad de la distancia mínima de frenado hacia adelante, el nivel de alumbrado puede disminuir gradual y linealmente hasta un valor igual a 0.4 de L_{th} al final de la zona de umbral. La reducción gradual durante la última mitad de la zona de umbral puede hacerse en escalones o de forma progresiva. Sin embargo, los niveles de luminancia no deben descender por debajo de los valores correspondientes a una disminución gradual.

DETERMINACIÓN DE LA LUMINANCIA EN LA ZONA INTERIOR

En función de la clase de túnel y de la distancia mínima de frenado se muestra la tabla 20, la cual proporciona valores recomendados para la iluminación de la zona interior.

Clase de túnel	Distancia mínima de frenado* (m)		
	≤ 60	100	≥ 160
4	3	6	10
3	2	4	6
2	1.5	2	4
1	**	0.5	1.5

*Calculada para pavimento seco

** No hay requisitos

Tabla 20 - Luminancia media de la superficie de la calzada de la zona interior en cd/m^2

LA ZONA DE SALIDA

A fin de asegurar una iluminación directa adecuada de los vehículos pequeños y a una visión suficiente por el retrovisor, la zona de salida tiene que ser iluminada del mismo modo que la zona interior del túnel.

En situaciones en las que se esperan peligros adicionales cerca de la salida del túnel, se aconseja que para túneles de clase de alumbrado 4 la luminancia durante el día en la zona de salida aumente linealmente a lo largo de una longitud igual a la distancia mínima de seguridad de frenado, a partir del nivel de la zona interior, a un nivel cinco veces el de la zona interior a una distancia de 20 metros, desde el portal de salida.

ALUMBRADO NOCTURNO

Durante la noche la longitud total del túnel es tratada de manera uniforme:

Si el túnel se encuentra en un tramo de carretera iluminado, las exigencias del alumbrado dentro del túnel deberían ser al menos iguales al nivel, uniformidades y control del deslumbramiento de la carretera de acceso.

La luminancia durante la noche no debería ser mayor que la luminancia de la zona interior durante el día; por lo tanto, la luminancia durante la noche debería de ser de entre 1 y 2 cd/m^2 , de acuerdo con el nivel exterior.

La uniformidad por la noche en los túneles debe satisfacer los mismos requisitos que el alumbrado durante el día.

Si el túnel es parte de una carretera que no está iluminada, la luminancia media de la superficie de la calzada debe ser del orden de 1 cd/m^2 , la uniformidad global al menos del 40% y la uniformidad longitudinal al menos del 60%.

EJEMPLO DE DISEÑO

CALCULO DE LA ZONA DE ACCESO (L20)

Para comenzar, es necesario conocer la distancia minima de seguridad de frenado (DMSF) aproximada para el túnel en metros. Dicho túnel se diseño tomando en cuenta una velocidad de diseño o de transito de 60 km/hr, remontándose a la tabla 14, es posible interpolar para obtener el valor del DMSF para dicha velocidad.

Interpolando entre las velocidades de 50 km/hr y 65 km/hr y sus respectivas distancias, el valor obtenido es de:

- DMSF = 86.66 m

Se usara el método aproximado para determinar la luminancia en la zona de acceso (L20), esto debido a que no se cuenta con información a detalle.

Tomando en cuenta los siguientes datos asumidos de la tabla 15:

- Porcentaje de cielo = 35%
- Clima = Normal
- Claridad = Alta
- DMSF = 100 - 160 m (Se toma el inmediatamente superior)

El resultado final es:

- $L20 = 6 \text{ cd/m}^2 = 6 \text{ lux}$

DETERMINACIÓN DE LA CLASE DE TÚNEL

Tomando en cuenta los valores de la tabla 17, ya que el túnel es unidireccional se espera que tenga un tráfico muy alto como para tener dos carriles de gran ancho, se considera que la intensidad del tráfico es media teniendo una cantidad entre 500 - 1500 vehículos/hora*carril respectivamente.

Aplicando la tabla 18 se puede determinar la clase de túnel para así determinar las demás luminancias.

El tipo de tráfico para este túnel se considera mixto ya que no está sujeto a solamente contar con vehículos motorizados.

Se derivan los siguientes valores:

- Intensidad de tráfico = Media
- Tipo de tráfico = Mixto (M)

Por ende:

- Clase de túnel = 3

CALCULO DE LA ZONA DE UMBRAL (LTH)

Una vez determinada la distancia minima de seguridad de frenado (DMSF) y la clase de túnel es posible encontrar mediante la tabla 19 el coeficiente k que sera de vital importancia para determinar el Lth.

Aplicando la tabla 19, es necesario interpolar entre los valores de 60 y 100 metros para determinar el coeficiente k.

- DMSF = 86.66 m
- Clase de túnel = 3

Tomando en cuenta los valores anteriores y llevando a cabo la interpolación:

- $k = 0.0466 = 0.05$

El valor de k no debe de exceder de 0.1.

Para determinar LTH se puede usar la siguiente formula:

- $k = (Lth/L20)$

Recordando que:

- $L20 = 6 \text{ cd/m}^2 = 6 \text{ lux}$

Entonces:

- $Lth = (k) * (L20) = (0.05) * (6 \text{ cd/m}^2) = 0.3 \text{ cd/m}^2 = 0.3 \text{ lux}$

CALCULO DE LA ZONA DE TRANSICIÓN (LTR)

A partir de la mitad de la distancia mínima de frenado hacia adelante, el nivel de alumbrado puede disminuir gradual y linealmente hasta un valor igual a 0.4 de L_{th} al final de la zona de umbral.

La reducción gradual durante la última mitad de la zona de umbral puede hacerse en escalones o de forma progresiva. Sin embargo, los niveles de luminancia no deben descender por debajo de los valores correspondientes a una disminución gradual.

Entonces:

- $L_{tr} = 0.4 * L_{th} = 0.4 * (0.3 \text{ cd/m}^2) = 0.12 \text{ cd/m}^2 = 0.12 \text{ lux}$

CALCULO DE LA ZONA INTERIOR Y LA ZONA DE SALIDA

Para determinar la luminancia de la zona interior del túnel es necesario aplicar la tabla 20, para ello se debe de tener a mano los siguientes valores:

- Distancia mínima de seguridad de frenado (DMSF) = 86.66 m
- Clase de túnel = 3

Interpolando entre los valores de 60 m y 100 m para la tercera clase de túnel, se obtiene el siguiente valor:

- $L_{in} = L_{ex} = 3.33 \text{ cd/m}^2 = 3.33 \text{ lux}$

DETERMINACION DE LAS LUMINARIAS

Anteriormente se determinaron cada una de las luminancias para cada una de las zonas que componen el túnel teóricamente hablando, esas son:

- $L_{20} = 6 \text{ cd/m}^2$
- $L_{th} = 0.3 \text{ cd/m}^2$
- $L_{tr} = 0.12 \text{ cd/m}^2$
- $L_{in} = L_{ex} = 3.33 \text{ cd/m}^2$

Para determinar la potencia que requiere que tenga la luminaria necesaria para alumbrar el túnel correctamente primero es necesario convertir los valores anteriormente encontrados, para eso se aplica lo siguiente:

- Ancho de la calzada + aceras = 12.5 m
- Distancia mínima de frenado (DMSF) = 86.66 m
- Longitud total del túnel = 556.18 m

El DMSF nada más aplica como distancia longitudinal para la zona de acceso, la zona de umbral y la zona de salida, por lo que:

- Longitud de la zona de acceso (L_{20}) = 86.66 m
- Longitud de la zona de umbral (L_{th}) = 86.66 m
- Longitud de la zona de transición (L_{tr}) = 60 m (por su velocidad de diseño)
- Longitud de la zona interior (L_{in}) = $556.18 \text{ m} - ((86.66 \text{ m}) \times (2)) - 60 \text{ m} = 322.86 \text{ m}$
- Longitud de la zona exterior (L_{ex}) = 86.66 m

Area de la superficie por cada zona del túnel:

- Acceso = $(86.66 \text{ m}) * (12.5 \text{ m}) = 1083.25 \text{ m}^2$
- Umbral = $(86.66 \text{ m}) * (12.5 \text{ m}) = 1083.25 \text{ m}^2$
- Transición = $(60 \text{ m}) * (12.5 \text{ m}) = 750 \text{ m}^2$
- Interior = $(322.86 \text{ m}) * (12.5 \text{ m}) = 4035.75 \text{ m}^2$
- Exterior = $(86.66 \text{ m}) * (12.5 \text{ m}) = 1083.25 \text{ m}^2$

Candelas (cd) por zona:

- L20 = $(6 \text{ cd/m}^2) * (1083.25 \text{ m}^2) = 6499.50 \text{ cd}$
- Lth = $(0.3 \text{ cd/m}^2) * (1083.25 \text{ m}^2) = 324.975 \text{ cd}$
- Ltr = $(0.12 \text{ cd/m}^2) * (750 \text{ m}^2) = 90 \text{ cd}$
- Lin = $(3.33 \text{ cd/m}^2) * (4035.75 \text{ m}^2) = 13439.047 \text{ cd}$
- Lex = $(3.33 \text{ cd/m}^2) * (1083.25 \text{ m}^2) = 3607.222 \text{ cd}$

Para una luminaria tipo LED normalmente un vatio o watt (W) equivale a 90 candelas (cd), este valor puede oscilar dependiendo del tipo de LED pero estandarizando las unidades este valor es el que se toma en cuenta.

Entonces:

- L20 = $(6499.50 \text{ cd}) * (1 \text{ W}/90 \text{ cd}) = 72.216 \text{ W}$
- Lth = $(324.975 \text{ cd}) * (1 \text{ W}/90 \text{ cd}) = 3.61 \text{ W}$
- Ltr = $(90 \text{ cd}) * (1 \text{ W}/90 \text{ cd}) = 1 \text{ W}$
- Lin = $(13439.047 \text{ cd}) * (1 \text{ W}/90 \text{ cd}) = 149.32 \text{ W}$
- Lex = $(3607.222 \text{ cd}) * (1 \text{ W}/90 \text{ cd}) = 40.08 \text{ W}$

Como reemplazo por consumo de energía eléctrica a los tradicionales luminarios HID para la iluminación general de los túneles vehiculares, que aun operan una lámpara de Vapor de Sodio en Alta Presión con una potencia de 400 W; se han desarrollado modernos y avanzados modelos de luminarios LED para la iluminación general de túneles vehiculares con una potencia de 196 W, los cuales integran 196 LEDs tipo SMD 3040 de 1 W de potencia unitaria, para las mismas aplicaciones y los cuales tienen las siguientes características técnicas de diseño, construcción y desempeño:

- Carcasa con disipador posterior de calor del conjunto óptico, fabricada en extrusión de aluminio o fundición de aluminio inyectada en alta presión.
- Acabado superficial externo de la carcasa del conjunto óptico con un tratamiento previo de fosfato de zinc con un recubrimiento de pintura termoendurecible de resina poliéster en polvo aplicada mediante proceso electrostático.
- 196 LEDs tipo SMD 3040 con potencia unitaria de 1W, cada uno de ellos con una óptica secundaria independiente fabricada de resina termoplástica transparente de alta trasmittancia.
- Conjunto óptico con un empaque termoformado perimetral interno fabricado de hule silicón o poliuretano de alta resistencia a la temperatura, para asegurar una alta hermeticidad de cierre con el marco portarefractor fabricado en extrusión de aluminio o fundición de aluminio inyectada en alta presión.
- Módulo de potencia independiente con disipador de calor, integrado por una carcasa la cual está fabricada en fundición de aluminio inyectada en alta presión, para alojar un controlador atenuable electrónico con una potencia de 196 W, con un voltaje de alimentación de 120 a 277 V o de 347 a 480 V de Corriente Alterna, para la operación de los 196 LEDs tipo SMD 3040 con potencia unitaria de 1 W.
- Refractor plano fabricado de vidrio claro termotemplado con un espesor de 5.6 milímetros (7/32 de pulgada) resistente a los impactos mecánicos y choques térmicos.

- Glándula hermética inferior del tipo roscada con diámetro nominal de 12.7 milímetros (1/2 de pulgada), ubicada en el módulo de potencia independiente para una entrada de tubo conduit con cable flexible de uso rudo, para la alimentación eléctrica al controlador atenuable electrónico con una potencia de 196 W.
- Conjunto óptico independiente que proporciona curvas de distribución fotométricas simétricas o asimétricas del tipo abiertas o medias.
- Herrajes y tortillería de sujeción o de montaje del luminario al muro o techo fabricados de acero inoxidable, para el aseguramiento mecánico de los componentes del conjunto óptico y módulo de potencia independientes.
- Ménsulas laterales ajustables de montaje a muro o techo para la fijación de la carcasa del módulo de potencia independiente, fabricadas en placa de acero inoxidable con un espesor de 3.175 milímetros (1/8 de pulgada).
- Conjunto óptico y módulo de potencia totalmente herméticos, con lo cual se asegura una alta protección contra el ingreso de partículas contaminantes sólidas o líquidas (IP65).
- Accesorios opcionales como guarda metálica de malla electrosoldada fabricada de acero inoxidable para la protección contra impactos mecánicos del conjunto óptico, cables de seguridad para la sujeción del luminario a la estructura o superficie de montaje, fabricados de acero inoxidable, así como visores superiores o laterales del conjunto óptico independiente para reducir deslumbramientos, fabricados en extrusión de aluminio o fundición de aluminio inyectada en alta presión.



Características técnicas de desempeño y operación	Luminario LED con una potencia de 196 W, para operar 196 LEDs tipo SMD 3040 con potencia unitaria de 1 W, para la iluminación general de túneles vehiculares.
Potencia de los 196 LEDs tipo SMD 3040	196 W
Temperatura de color de los 196 LEDs tipo SMD 3040	5000 K
Índice de rendimiento de los 196 LEDs tipo SMD 3040	80
Vida útil de los 196 LEDs tipo SMD 3040	50,000 horas (L-70)
Flujo luminoso de los 196 LEDs tipo SMD 3040	19,600 lúmenes fotópicos iniciales
Depreciación del flujo luminoso de los 196 LEDs tipo SMD 3040	30% a las 50,000 horas de vida útil
Relación S/P de los 196 LEDs tipo SMD 3040	2.0
Potencia total de consumo del luminario	216 W
Flujo luminoso total del luminario	17,640 lúmenes fotópicos iniciales
Temperatura ambiental de operación del luminario	- 30 a 50° C
Dispositivo de operación de los 196 LEDs tipo SMD 3040	Controlador atenuable electrónico de alta frecuencia con potencia de 196 W
Voltaje de alimentación al dispositivo de operación de los 196 LEDs tipo SMD 3040	120 a 277 V o 347 a 480 V CA
Frecuencia de alimentación a los 196 LEDs tipo SMD 3040	40 KHz
Factor de potencia	0.95
Rango de atenuación	10 a 100% del flujo luminoso
Tiempo de encendido y reencendido de los 196 LEDs tipo SMD 3040	1 a 1.5 segundos y 1 segundo
Distorsión Total de Armónicas	20%
Ahorro en el consumo de energía eléctrica en comparación con un luminario HID para la iluminación general de túneles para operar una lámpara de Vapor de Sodio en Alta Presión (VSAP) con una potencia de 400 W.	55 %

Tabla 21 - Especificaciones técnicas de la luminaria LED tipo SMD 3040

Un diseño que garantice seguridad y buena visibilidad, es un elemento clave para el éxito de cualquier proyecto de iluminación de túneles. FlowBase Philips combina un diseño compacto, contabilidad y un costo accesible, en un paquete completo para brindar una solución de iluminación perfecta para cualquier aplicación de túneles.

FlowBase es realmente rentable, ofrece ahorros de energía maximizados hasta de un 50% en comparación con sistemas de iluminación convencionales. Para ahorro de costos y óptima durabilidad, FlowBase es la luminaria LED que ofrece una alta eficacia del sistema, un diseño térmico optimizado y una óptica de iluminación de túneles diseñada para lograr el mejor rendimiento de W/m² en aplicaciones de túnel.

FlowBase es la luminaria diseñada para iluminación de túneles, teniendo en cuenta la seguridad y la comodidad de los automovilistas. Ofrece una perfecta uniformidad y mínimo resplandor, cumpliendo con los estándares de iluminación de túneles para garantizar la seguridad en su interior. La alternativa de actualización LED perfecta para aplicaciones fluorescentes y HPS 250W. FlowBase es fácil de instalar y mantener, garantizando una larga vida útil de hasta 50.000 horas.

- Túneles de 2 carriles: 12-14 metros de ancho, instalación simétrica o escalonada, con velocidades de hasta 60-80 km/h.
- Túneles de 2 a 3 carriles: 14-15 metros de ancho, instalación simétrica, con una velocidad de hasta 60-80 km/h.
- Túneles de 2 carriles: 9 -10 metros de ancho, instalación escalonada, con una velocidad de hasta 60-80 km/h.

Características y Beneficios:

- Ahorro de energía maximizado. Reduce la necesidad de instalar numerosas luminarias para ofrecer un ahorro de energía optimizado de hasta un 50% con el menor W/m².
- Óptima seguridad. Proporciona suficiente iluminación, perfecta uniformidad y mínimo resplandor. Cumple con las normas de iluminación de túneles para garantizar una protección y visibilidad completa en su interior.
- Fácil instalación. Equipada con soportes de montaje que se pueden ajustar + / 60 grados para adaptarse por completo a las diferentes aplicaciones de túneles.
- Flexible configuración. Ofrece cuatro configuraciones de carcasa para cubrir paquetes de lúmenes de 2.900 lm a 25.700 lm para garantizar un diseño óptimo de la iluminación del túnel y ahorro de costos.
- Interfaz de control habilitada. Admite interfaces DALI y 1-10V que se pueden usar con la solución TunneLogic Philips y otros controles disponibles.
- Superior confiabilidad. Diseñada con componentes de alta calidad que proporcionan una larga vida útil.
- Diseñada y construida, con base en la última tecnología de iluminación.
- Alternativa LED rentable en comparación a las luminarias de túnel convencionales.
- Excelente diseño térmico que ha sido probado para operar en ambientes extremos (la luminaria puede operar a una temperatura ambiente de hasta 45°C).
- Luminaria elegante y completamente sellada sin tornillos en su tapa frontal.

Características generales

Modelo	FlowBase - BWP352
Clasificaciones	IP66, IK08, Clase I, RoHS

Características técnicas de la luz

Paquete de Lúmenes del sistema	2.900 lm a 25.700 lm
Temperatura de Color	4000K (NW)
Índice de Reproducción de Color	75 ± 5

Características eléctricas

Poder del sistema	25W-240W
Potencia nominal	120 - 277V 50Hz/60Hz
Factor de potencia	> 0.95 (potencia nominal)
Interfaz de control (no personalizada)	1-10V; Dab; Amplitud

Características ambientales

Óptica	DM2 Túnel óptico (óptica expuesta)
Temperatura de funcionamiento	-30C a 45C Tem ambiente
Vida útil	50.000 horas (70% mantenimiento del lumen @ Ta = 35°C)
Instalación	Ajustable ± 60 grados (montaje en pared /techo)

Características mecánicas

Material de la carcasa	Aluminio fundido a alta presión
Material óptico	Polycarbonato grado transparente, resistente a la intemperie

Datos del producto

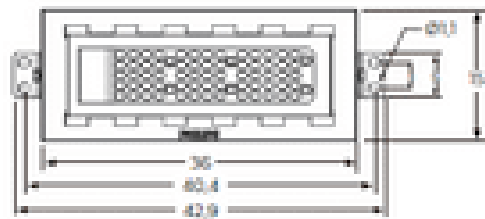
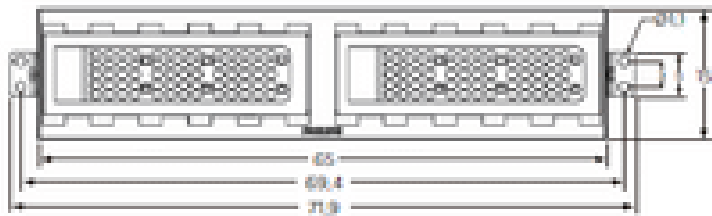
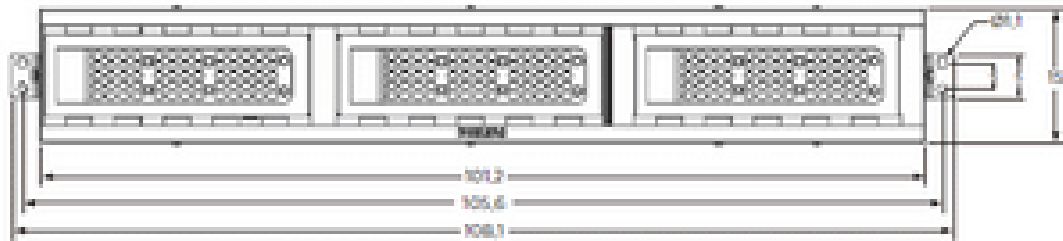
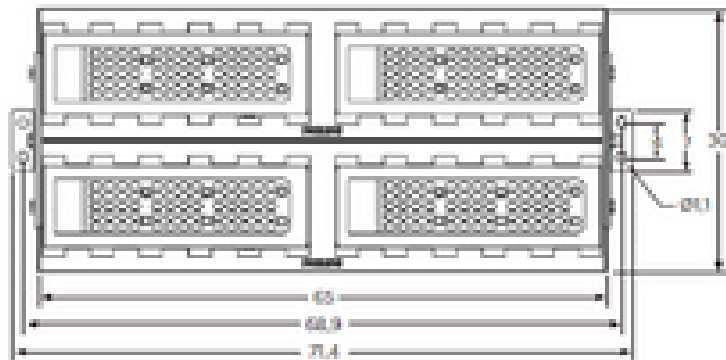
Protección de sobretensión	10KV (versión AC)
Dimensiones (L x W x H) y peso	Max 60W (42,9 x15 x12,2) 3,5 kg Max 120W (71,9 x15 x12,2) 4,5 kg Max 180W (108,1 x 15 x 12,2) 8,5 kg Max 240W (71,4 x 30 x 23,3) 9,5 kg
Certificaciones	CQC, CB IEC60598, CE

Información para pedidos

BWP352 LED29/NW 25W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED65/NW 60W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED82/NW 70W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED91/NW 80W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED101/NW 90W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED110/NW 100W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED129/NW 120W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED166/NW 150W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED194/NW 180W 120-277V DM2 MP1
BWP352 LED257/NW 240W 120-277V DM2 MP1

Tabla 22 - Especificaciones técnicas de la luminaria LED Philips FlowBase





CONTILED está diseñada como alternativa de grandes ventajas respecto a las luminarias equipadas con lámparas fluorescentes para iluminación de línea continua en túneles y pasos subterráneos.

No sólo proporciona los niveles de iluminación requeridos con un significativo ahorro de energía, sino también un gran confort visual para guiar con seguridad a los conductores.

CONTILED es una luminaria sellada IP 66 que ofrece combinaciones variables de módulos equipados con 8 a 64 LED y varias ópticas para adaptarse a las necesidades específicas de aplicaciones para túneles muy diversas.

Los módulos LED están situados sobre una pieza deslizante interna que se puede retirar fácilmente, permitiendo la sustitución al final de su vida útil para aprovechar futuras mejoras tecnológicas.

Tipos de aplicaciones:

- Túnel y pasos inferiores

Ventajas clave:

- Alto confort visual gracias a línea continua
- 2 conceptos fotométricos: LensoFlex®2y ContiFlex™
- Solución flexible: perfil de aluminio extruido para ajustar el número de LEDs a los requerimientos del túnel
- Ahorros maximizados en costos de energía y mantenimiento
- El sistema de control se puede integrar en el sistema troncal

INFORMACIÓN GENERAL	
Driver incluido	No
Marca CE	Sí
Certificado ENEC	Sí
UL certified	Sí
Conformidad con RoHS	Sí
Ley francesa del 27 de diciembre de 2018: cumple con los tipos de aplicaciones	a, b, c, d, e, f, g
Norma del ensayo:	LM 79-80 (todas las mediciones en laboratorio certificado según ISO17025)
CARCASA Y ACABADO	
Carcasa	Aluminio
Óptica	PMMA
Protector	Vidrio templado
Acabado de la carcasa	Recubrimiento estándar de polvo de políester (C2-C3 según la norma ISO 9023-2012) Recubrimiento opcional de polvo de políester "seaside" (C4 según la norma ISO 9023-2012) Recubrimiento opcional de políester en polvo "seafront" con anodización (C5-C6 según la norma ISO 9023-2012)
Grado de hermeticidad	IP 68
Resistencia a los impactos	IK 08
CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO	
Rango de temperatura de funcionamiento (Ta)	-30 °C a +45 °C / -22 °F a 113 °F

Tabla 23 - Especificaciones técnicas de la luminaria CONTILED

DIMENSIONES Y MONTAJE

AxBxC (mm | pulgadas)

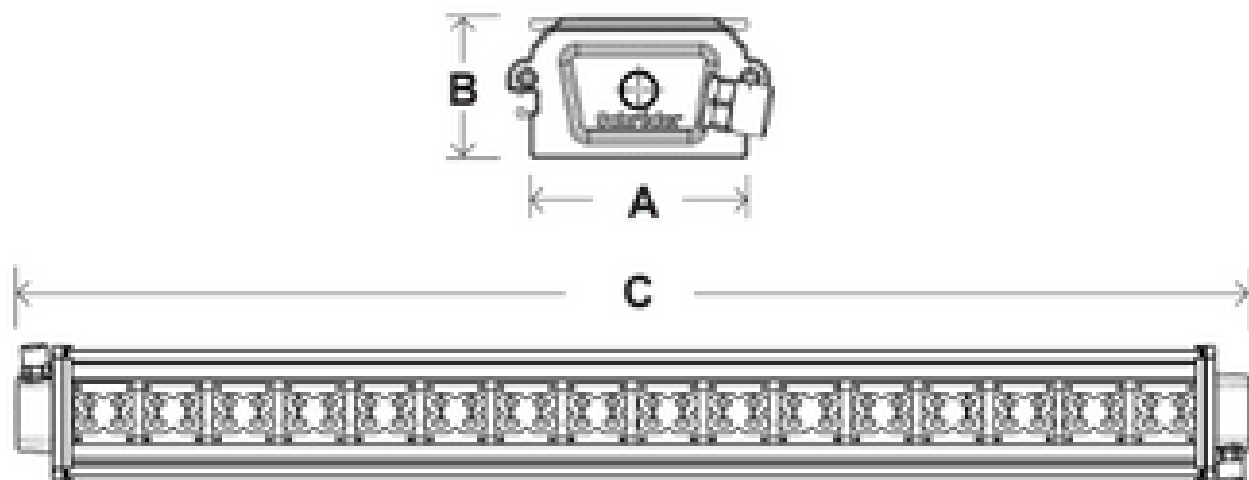
CONTILED 1 - 124x67x602 | 4.9x2.6x23.7
CONTILED 2 - 124x67x1202 | 4.9x2.6x47.3

Peso (kg | lb)

CONTILED 1 - 7 | 15.4
CONTILED 2 - 14 | 30.8

Posibilidades de montaje

Soporte para un montaje en superficie



10

CAPÍTULO 10

MANTENIMIENTO

**MANTENIMIENTO
PREVENTIVO Y
CORRECTIVO** PG 171

**OPERACIONES A
REALIZAR SOBRE
LOS ELEMENTOS** PG 173

10

Las operaciones de mantenimiento ordinario de las infraestructuras viarias son, en gran parte, aplicables a los túneles. Sin embargo, los túneles carreteros tienen una fuerte especificidad en sus estructuras y una complejidad en sus instalaciones que hacen necesario dedicarles una consideración especial.

Como en cualquier otra estructura, la problemática es más compleja y los costes son mayores cuanto mayor sea la longitud y la anchura del túnel. Conviene dividir las operaciones a realizar en dos apartados:

- Mantenimiento de la Obra Civil
- Mantenimiento de las Instalaciones.

Respecto a las operaciones a realizar, se describirán en este capítulo las operaciones de mantenimiento ordinario, quedando fuera de su alcance las de mantenimiento extraordinario o de reconstrucción y reposición, que son siempre muy específicas de cada caso.

Incluso para el mantenimiento ordinario, cada túnel es un problema diferente, y cada uno tiene unas particularidades que lo hacen único. Se ha intentado considerar las tipologías estructurales más habituales hoy en día, y la totalidad de las instalaciones que son de uso corriente en los túneles españoles y extranjeros, pero la evolución técnica y la variación de las tipologías de los instrumentos y de los equipos hacen imprescindible la actualización frecuente de las listas de elementos a mantener.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO

La organización del mantenimiento ordinario de túneles debe obedecer a los siguientes principios:

- Asegurar que el túnel y sus elementos estén en un estado que permita la circulación de vehículos en las condiciones de seguridad y comodidad para las que fue proyectado.
- Obtener este objetivo al menor coste posible.

Para la realización de las operaciones de mantenimiento, se suelen dividir las mismas según la motivación que ha provocado la intervención:

Se llaman intervenciones preventivas a aquellas que tienen como causa la verificación del estado del elemento a mantener. Según las operaciones de mantenimiento que se realicen, se puede tratar de:

- Inspecciones
- Limpiezas
- Verificaciones funcionales
- Revisiones periódicas

La inspección consiste en la observación del estado de conservación del elemento. La limpieza añade a la inspección el trabajo rutinario de mantenimiento. Si el elemento debe funcionar, como es el caso de muchos elementos electrónicos, la verificación funcional comprueba la correcta respuesta de sus estados posibles. La revisión periódica, por último, es el tipo más completo de revisión de mantenimiento preventivo y comprende la inspección, la limpieza, la comprobación funcional, si es el caso, y cualquier otro tipo de mantenimiento rutinario, como por ejemplo el engrase, la comprobación de intensidades de vibración, la medida de dimensiones que deban ser objeto de seguimiento, etcétera.

Es frecuente que durante una revisión preventiva aparezcan pequeños defectos. En ese caso, aparte de su constatación y documentación, conviene repararlos en la misma operación para aproximarse al objetivo de ·óptimo económico. Por supuesto, los defectos no reparables en el momento deben documentarse para ser reparados más tarde.

- El **mantenimiento correctivo** tiene como objeto la reparación de estos defectos no subsanables en el momento y de las averías inesperadas. Resulta muy conveniente recoger fielmente la operación realizada, así como los medios empleados y el grado en que se ha corregido el motivo de la actuación.
- El **mantenimiento predictivo** consiste en el análisis de las operaciones de mantenimiento para su optimización, y para ajustar tanto las operaciones como su periodicidad a un máximo de eficacia.

Resulta utópico, pero si fuese posible reemplazar todos los elementos o repararlos justo cuando están a punto de empezar a mostrarse defectuosos de forma grave, se tendría un mantenimiento eficaz a coste mínimo.

Para poder realizar un mantenimiento eficaz es muy conveniente disponer, desde el primer día, de un registro de las operaciones y de las incidencias, tanto del mantenimiento preventivo como del correctivo. Es muy recomendable que este archivo esté informatizado, lo cual permitirá, no tan sólo el control de costes, sino el análisis de las causas, frecuencias y tipologías de las averías, todo lo cual proporciona la base para la optimización de los costes de explotación.

OPERACIONES A REALIZAR SOBRE LOS ELEMENTOS

Los elementos a mantener los agruparemos en:

- Elementos de obra civil
- Elementos de instalaciones

y los principales grupos son los siguientes:

Obra Civil

1. Pavimentos
2. Aceras y bordillos
3. Drenaje
4. Impermeabilización
5. Elementos de sostenimiento (bóveda y hastiales)
6. Revestimientos funcionales
7. Marcas viales
8. Balizamiento y señalización

Instalaciones

1. Suministro de energía y centros de transformación
2. Iluminación
3. Ventilación
4. Detección y extinción de incendios
5. Postes de auxilio SOS
6. Detección y control de tráfico
7. Televisión en circuito cerrado
8. Radiocomunicaciones
9. Sistema de transmisión de datos
10. Centro de Control.

PAVIMENTOS

La mayoría de operaciones de mantenimiento de pavimentos en un túnel son iguales a las que se realizan en exterior. La principal diferencia es que no cabe contar con la limpieza de la lluvia, por lo que debe baldearse y barrerse regularmente el pavimento, con una frecuencia entre mensual y semestral según los casos.

Otras operaciones ordinarias deben ser la detección de grietas, la vigilancia de rodadas en zonas de subida y presencia de tráfico pesado, y la observación del estado de las juntas si el pavimento es de hormigón.

Si se ha usado mezcla drenante en la capa de rodadura del pavimento bituminoso, debe prestarse atención al estado del mismo, sobre todo si su permeabilidad dificulta o impide observar el inicio de formación de goteras en la bóveda o en el pavimento.

ACERAS Y BORDILLOS

De estos elementos, tal vez el aspecto al que debe prestarse la máxima atención es al estado de las múltiples arquetas que suelen estar colocadas en ellos. Deben limpiarse con barredora aspiradora al menos semestralmente.

Si la instalación lo soporta es muy conveniente el baldeo, pero deben sopesarse los inconvenientes del mismo. En el caso de usar detergentes o desincrustantes debe prestarse atención al efecto de éstos sobre las aguas de vertido.

DRENAJES

Un primer elemento de drenaje a mantener es la canaleta de pie del hastial. Conviene mantenerla limpia y en buen estado para evitar que las aguas que recoja no lleguen a la calzada, máxime si el peralte les hace cruzarla, por el problema que puede representar al tráfico.

El resto del drenaje longitudinal, tubos arquetas e imbornales, deben ser objeto de los cuidados, limpiezas y baldeos habituales, con frecuencia entre semestral y anual.

Se recomienda que el túnel disponga de dos redes de drenaje separadas, una que recoja las aguas de la calzada, así como de los baldeos o limpiezas, y otra que recoja las procedentes de filtraciones del terreno. Mediante esta separación pueden tratarse adecuadamente y del modo más sencillo los vertidos a cada una de ambas redes.

Deben analizarse periódicamente las aguas recogidas de filtración para verificar su agresividad respecto al hormigón.



Ilustración 62- Ejemplo de un mal drenaje interno en un túnel semicircular

Este punto se refiere a la lámina que conduce el agua de filtración procedente del terreno hacia las estructuras de drenaje.

Sobre este elemento pueden darse dos casos:

- En el caso de túneles con revestimiento de hormigón bombeado, la lámina queda entre el hormigón y el terreno, o entre el hormigón y el revestimiento provisional, y es continua, termosoldada y no accesible.
- En el caso de túneles con revestimiento de hormigón proyectado, o colocado con técnica Bernold o similar, la lámina es visible y va colocada sobre el revestimiento definitivo mediante remaches o anclajes.

Si la lámina no es accesible, poco puede hacerse, excepto su reparación donde no asegure la estanqueidad. Por contra, en el caso de ser una lámina en el intradós debe comprobarse periódicamente el estado de envejecimiento de la lámina y la integridad de los anclajes.

Este mantenimiento, que suele hacerse a la vez que el de la bóveda del túnel, debe ser semestral y especialmente intenso en las proximidades de los ventiladores o en zonas de tráfico pesado próximo, debido a la fatiga que pueden causar ambos agentes.

Es frecuente que aparezcan goteos o pequeños caudales en zonas anteriormente secas. Debe analizarse en cada caso si tal hecho puede ser indicador de alguna alteración en el terreno circundante que convenga tratar. En general, la captación de estos caudales es siempre preferible a intentar taponarles, pues el agua acabará saliendo por otro lugar, a menudo más perjudicial.

Se considerarán tan sólo los dos tipos más usuales de sostenimiento:

- Revestimiento de hormigón proyectado con o sin cerchas de refuerzo.
- Revestimiento de hormigón en masa o armado.

No se considera, pues, el caso de túneles sin revestimiento, o con revestimiento de mampostería, que al ser instalaciones antiguas suelen presentar problemáticas propias y no generalizables.

Los túneles con revestimiento de hormigón proyectado en una o varias capas suelen tener un refuerzo metálico, sea en forma de malla metálica electrosoldada, sea mediante fibras de acero mezcladas con el árido durante la proyección. En estos casos, a la observación periódica de la bóveda y de los hastiales, en busca de grietas, fisuras o surgencias de agua, debe añadirse la atención a los indicios de oxidación y a los descolgamientos de parte de una capa que puedan producirse. Se recomienda examinar la bóveda desde cerca y con una adecuada iluminación, realizando auscultaciones por golpeo para detectar zonas donde se hayan producido huecos entre capas, y que puedan acabar en el desprendimiento de lajas de gunitado, con peligro para el tráfico.

Si existen cerchas de refuerzo debe controlarse su estado, y su posible oxidación.

La bóveda y hastiales de hormigón encofrado presentan un mantenimiento menor. Conviene prestar atención periódica a la aparición de grietas, cuya presencia debe comunicarse a especialistas, y a los efectos del agua. Conviene tomar muestras periódicamente de ésta para verificar su compatibilidad con el hormigón.

REVESTIMIENTOS FUNCIONALES

Se trata de láminas de diversos materiales (fibrocemento, hormigón, metálicos, etc.) que se colocan revistiendo los hastiales hasta una altura de algunos metros, con el objetivo de mejorar la visibilidad del tráfico y el nivel de luminosidad interior del túnel. Su mantenimiento es específico de cada caso, pero siempre se debe prestar atención al estado de los anclajes, para asegurar que no puedan desprenderse y caer sobre la calzada, y a su limpieza.

La limpieza de los hastiales suele hacerse de forma totalmente mecánica, mediante chorro de agua con o sin frotación, detergente y, a veces, con un desincrustante.

Debe prestarse atención a la naturaleza de los productos empleados, puesto que se incorporarán a la red de drenaje y deben ser tratados adecuadamente.

La frecuencia de las limpiezas depende de la intensidad de tráfico, de la presencia de vehículos pesados y de la inclinación de la rasante, siendo recomendables periodicidades entre trimestrales y semestrales.

MARCAS VIALES

Su mantenimiento es idéntico al caso del exterior. Deben limpiarse, sobre todo en las zonas próximas a las bocas, de acuerdo con la periodicidad fijada para las aceras y bordillos.

Aquí pueden distinguirse tres tipos de elementos:

- Ojos de gato reflexivos o similares
- Reflectantes tipo hitos de arista
- Cartelería y señales de código

Los ojos de gato requieren una limpieza periódica, que suele hacerse coincidir con el baldeo de pavimento. Debe controlarse su reflexividad pues disminuye con el tiempo, o se pierde por rotura, sobre todo con tráfico pesado.

Lo mismo puede decirse de los hitos de arista. A este respecto deben usarse hitos de arista si los hastiales del túnel proporcionan una mala reflexión o no están revestidos, para mejorar la seguridad de la circulación.

Los carteles informativos o las señales de tráfico requieren limpieza. Lo mejor es hacerla frecuente y sólo con agua, pues los detergentes, al secarse, dejan variaciones en la reflexividad muy perceptibles.

Los elementos de sostenimiento de la cartelería y la lomillería deben estar galvanizados y adaptados a la atmósfera agresiva del túnel, y deben verificarse periódicamente (una vez al año aproximadamente) en integridad, apriete y corrosión.

Respecto al cuadro eléctrico de distribución de energía para la iluminación, su revisión es similar al del cuadro general de baja, y suele hacerse con la misma periodicidad. Resulta también de aplicación lo dicho allí respecto a la conveniencia de dejar sin tensión el cuadro, si es posible, pero en este caso suele ser difícil hacerlo manteniendo iluminado el túnel, por lo que deberá aislarse la parte de cuadro que no sea posible desactivar.

En el caso de que, durante esta revisión, se produzcan estados de iluminación en el túnel que no se correspondan con los niveles requeridos por la luminosidad exterior y por el tráfico, deben adoptarse las medidas de seguridad y de advertencia oportunas.

Las luminarias y sus soportes deben ser objeto de mantenimiento preventivo. Las bandejas, soportes y carcasa de las luminarias deben ser objeto de atención anual, revisando la estanqueidad, oxidación y correcto anclaje. Conviene limpiar las luminarias entre una y dos veces al año, dependiendo de cómo evolucione su comportamiento.

Deben reponerse las bombillas fundidas precozmente para que no se produzca el cebreado tan molesto a los conductores. Igualmente debe procederse al cambio en grupo de proyectores cuando se produzca alguna de estas circunstancias:

- Se observa un aumento progresivo en el número de lámparas fundidas en la rama correspondiente a ese nivel luminoso.
- Se observa un incremento de consumo en la línea del orden de un 6 a un 10%.
- Se observa una pérdida de luminosidad en las lámparas de ese grupo.

Se recomienda contrastar con la experiencia propia las indicaciones de los fabricantes respecto al número de horas de funcionamiento para el agotamiento de la lámpara. Tal vez la indicación más sencilla es la observación de la curva de mortalidad, puesto que cuando se empiezan a agotar los proyectores se incurva con cierta brusquedad. Las lámparas de vapor de sodio de alta presión y las de mercurio vienen a durar lo mismo, y ambas un poco menos que las de vapor de sodio de baja presión.

Por último, conviene comprobar periódicamente los elementos de control de la iluminación, sean células fotoeléctricas, luxómetros o iluminancímetros. Modernamente se tiende hacia el uso de iluminancímetros situados en el exterior del túnel a unos 100 m de la boca, y orientados hacia ella, con el objetivo de medir adecuadamente el contraste luminoso. Dada su influencia en el consumo de energía, se recomienda periodicidad al menos semestral.



Ilustración 63 - Mantenimiento de las luminarias de un túnel

Los elementos a mantener son:

- Pulsadores de alarma de incendio
- Detectores de incendio
- Centrales de alarma
- Hidrantes
- Extintores
- Tubería seca o húmeda

Los pulsadores de alarma suelen estar situados cada 100 a 200 m en el túnel. Su mantenimiento se limita a una comprobación funcional semestral, dado que son equipos con pocos fallos, y a una limpieza anual.

Los detectores de incendio pueden ser iónicos, ópticos, de fusible o de termopar en función de su principio de funcionamiento.

Su mantenimiento es específico de cada caso, pero dado su carácter de equipo de emergencia conviene seleccionar el modelo entre los que puedan ser objeto de verificación funcional, puesto que algunos equipos, como por ejemplo los de fusible, que consisten en un elemento sensible que funde a cierta temperatura y causa un cortocircuito que es el aviso de posible incendio, no pueden ser comprobados funcionalmente.

Los extintores de incendios suelen colocarse en los postes de auxilio del interior de los túneles para proporcionar a los usuarios la capacidad de extinguir un conato de incendio en sus fases iniciales. Su mantenimiento tiene una regulación específica, que exige su retimbrado periódico y la verificación de su estado de servicio. Conviene que sean de polvo polivalente o de dióxido de carbono, y no mayores de 5 kg para que su manejo resulte sencillo.

CUADRO DE PERIODICIDADES

Con el objetivo de que los responsables del mantenimiento puedan llevar a cabo un planeamiento adecuado del calendario de actividades, se presenta un cuadro que, para cada elemento, indica una periodicidad mínima y una máxima para cada tipo de revisión. Repetimos, una vez más, que cada túnel es un caso particular y que no se pueden generalizar soluciones sin adaptarlas cuidadosamente, pero los datos proporcionados pueden tomarse inicialmente como válidos, hasta que la experiencia los adapte mejor al caso concreto.

Debe tomarse también en cuenta que, en cualquier infraestructura o instalación, existirá un período de inicio de servicio, en el que serán necesarias diversas reparaciones o ajustes para acabar totalmente la obra. Conviene que dichas incidencias estén cubiertas por la garantía del constructor o del instalador. Las periodicidades y operaciones aquí indicadas corresponden a una instalación ya entregada definitivamente, pero en buen estado de servicio.

Se consideran las siguientes periodicidades:

- PA - Plurianual
- A - Anual
- S - Semestral
- T - Trimestral
- M - Mensual
- Q - Quincenal
- S - Semanal
- D - Diaria
- H - Por tiempo de funcionamiento

ELEMENTO	TIPO DE REVISIÓN							
	Inspección		Limpieza		Funcional		Periódica	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Obra Civil								
1. Pavimentos			S	M			A	PA
2. Aceras y bordillos			S	T				
3. Drenaje •Canaleta de pie •Tubos, arqueta, imbornales			T A	M S				
4. Impermeabilización	A	S	A	S				
5. Elementos de sostenimiento	A	S	(1)				PA	S
6. Revestimiento funcional			S	T			A	S
7. Marcas Viales			S	T				
8. Balizamiento y señalización •Ojos de gato •Hitos de arista •Cartelería y señales •Pórticos de sustentación			S S A	M T S			PA	A
Instalaciones								
9. Energía •Transformadores •Cámara A.T. •Cuadro general B.T. •Cuadro distribución B.T. •SAI •Grupo electrógeno •Red de puesta a tierra •Tomas de corriente	S S S S	T T T T			S S T M	T T M Q	A A A A PA A A	S S S S A S S
10. Iluminación •Cuadro de distribución •Luminarias •Lámparas •Células/Luxómetros	S M	T Q	A S S	S T	S T		A A PA A	S S H S
11. Ventilación •Detectores •Anemómetros •Ventiladores	M	Q			T S	M T	A A A	S S A
12. Detección y extinción de incendios •Pulsadores de alarma •Detectores •Control de alarma •Hidrantes •Extintores •Tubería seca o húmeda					S A A A	A S S T S	A A A A PA	A S S S A
13. Postes de auxilio SOS					M	Q	A	A

Tabla 23 - Tipo de revision para cada elemento según su periodicidad

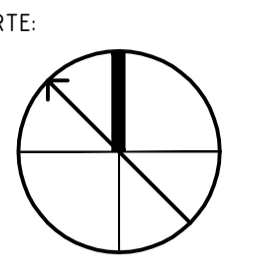
CAPÍTULO 11

PLANOS

11

SECCIÓN TRANSVERSAL	PG	1
VISTA EN PLANTA Y PERFIL	PG	2
TRAMO Y PERFIL #1	PG	3
TRAMO Y PERFIL #2	PG	4
DIAGRAMA DE MASA	PG	5
CUADRO DE ALINEAMIENTO	PG	5

SECCIONES TRANSVERSALES



CATREDRÁTICO:
MIEMBROS DE TERNA

PROYECTO:
Diseño de túnel carretero -
Proyecto de Graduación Fase I

CONTENIDO:

- SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TÚNEL
- SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TÚNEL EN USO
- SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TÚNEL CON BAHIA DE EMERGENCIA

ALUMNOS:

DANIEL ARMANDO CABALLERO CALDERINI - 21741102
RONEY JARED URIAS MARTINEZ - 20911208
PAOLA JARUFE LARACH - 21711153

OBSERVACIONES:

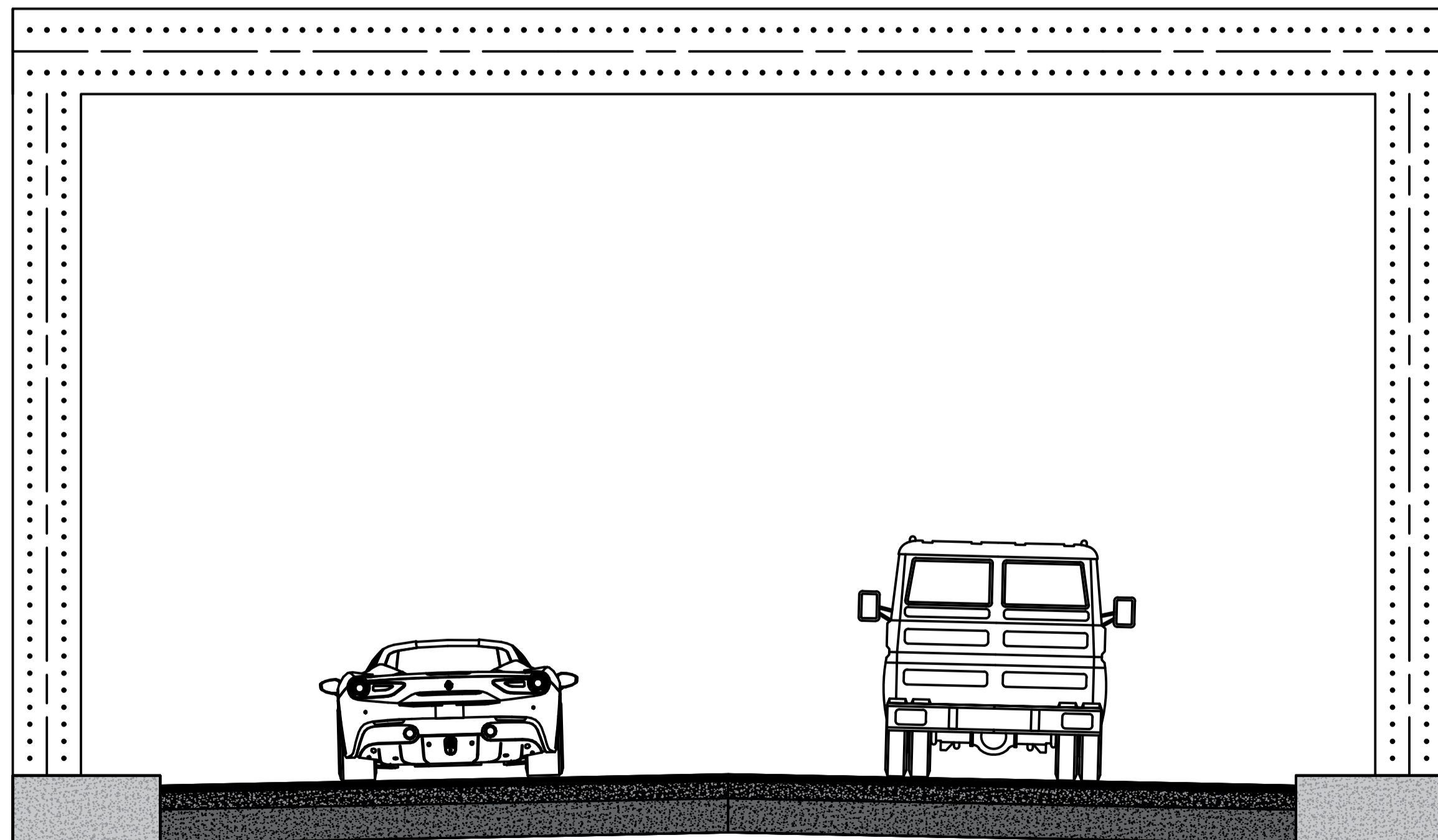
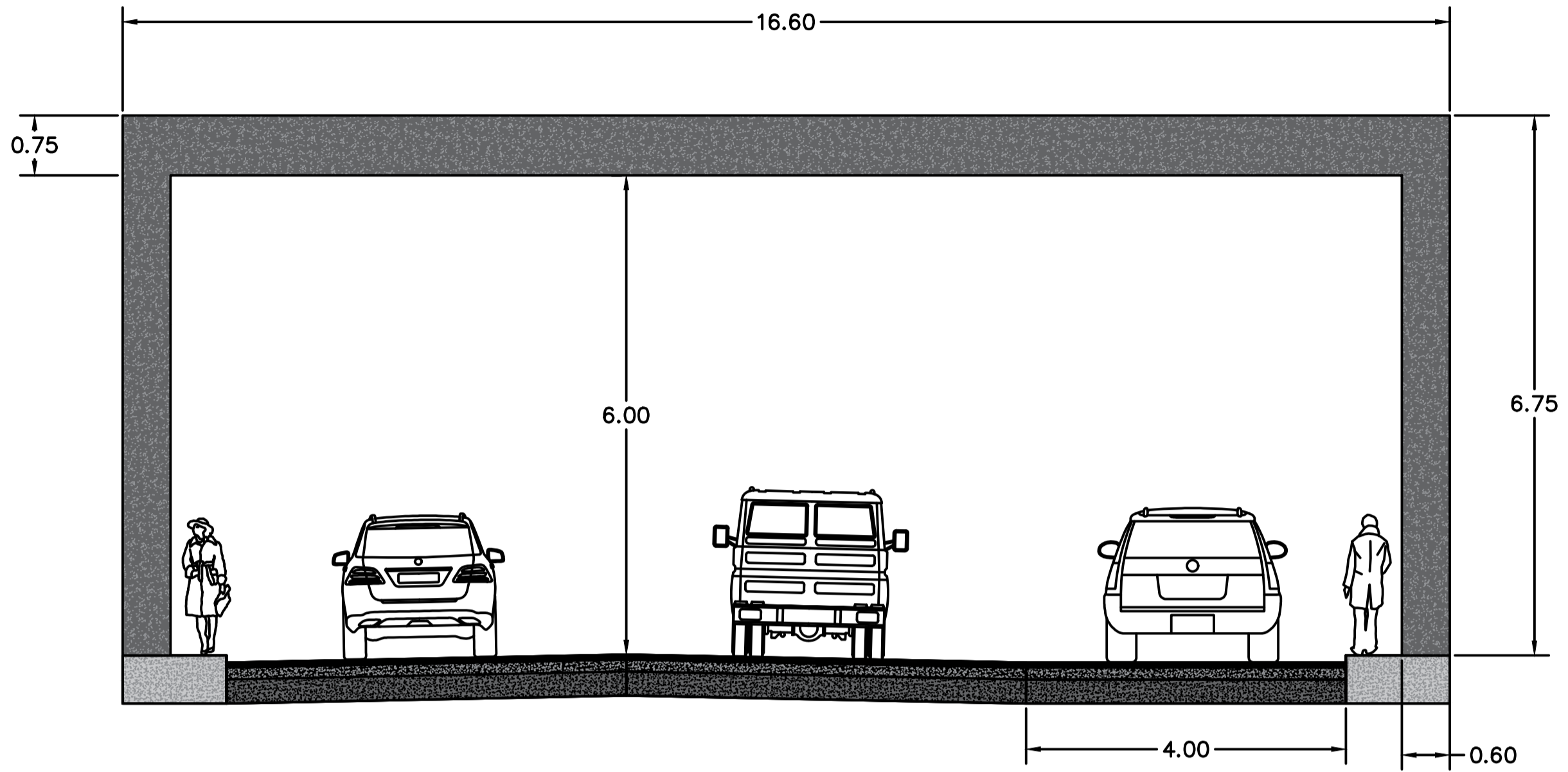
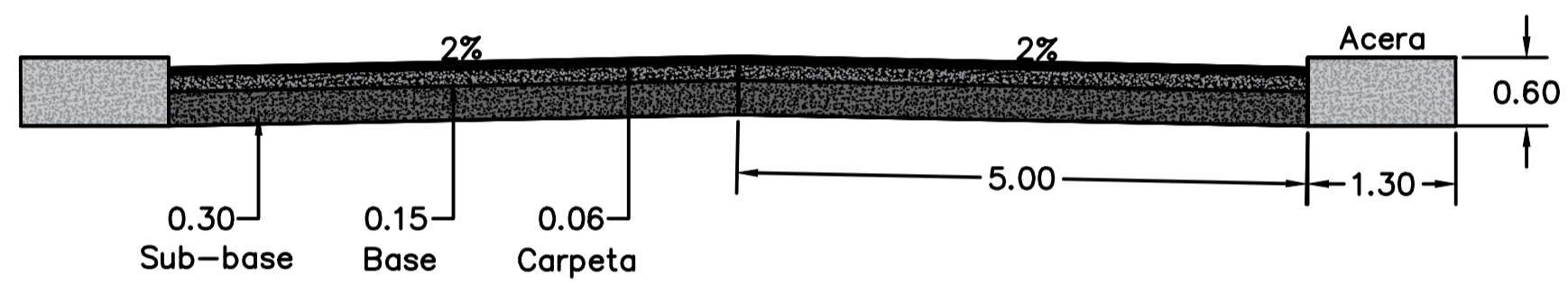
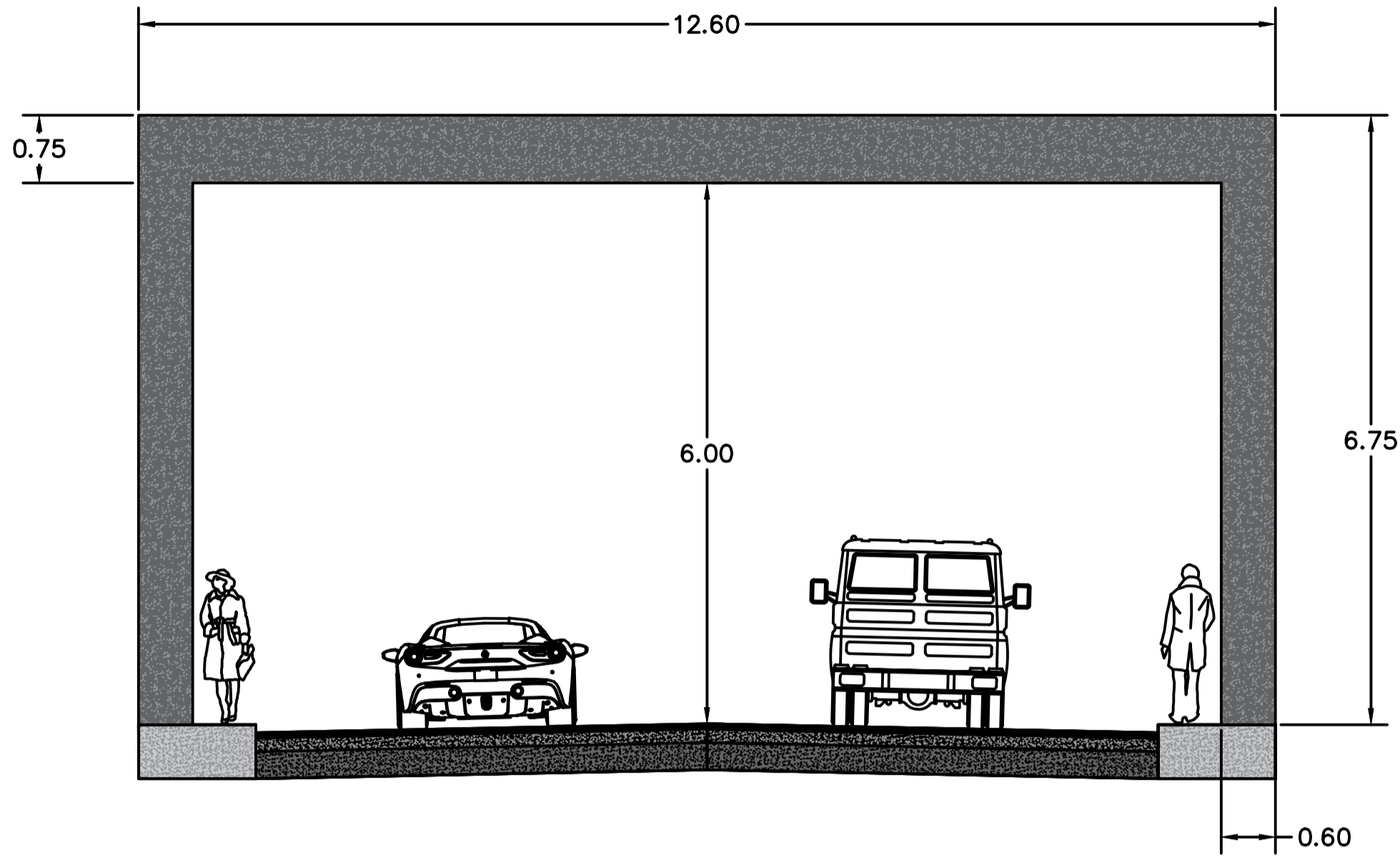
- LONG. TOTAL DEL TÚNEL: 556.18 METROS
- UBICACIÓN: GRAN CENTRAL METROPOLITANA, SPS
- TPDA: 30,000 VEHICULOS
- UNIDADES DE LAS SECCIONES EN METROS

ESCALA: LUGAR Y FECHA:

Especificada en planos S.P.S 30/ENE/2022

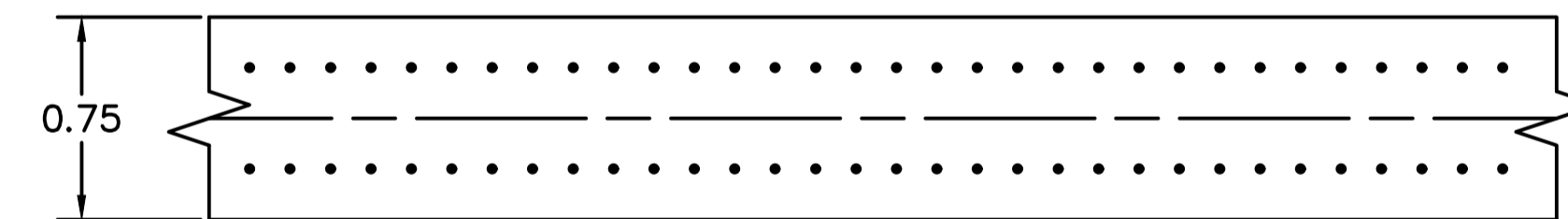
REVISIÓN LÁMINA:

01 PLANO 01/100 C-001



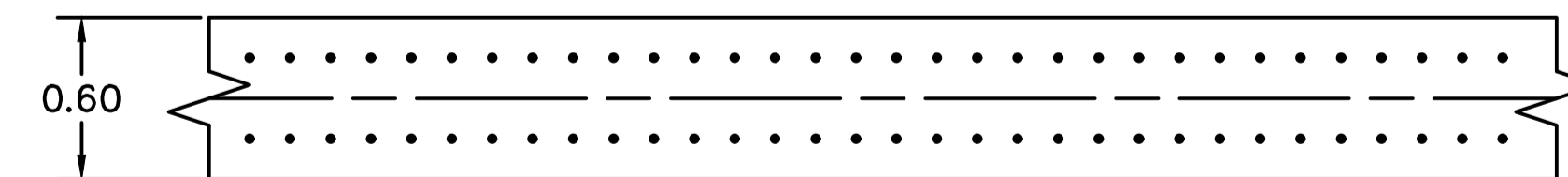
Losa Superior (Techo)

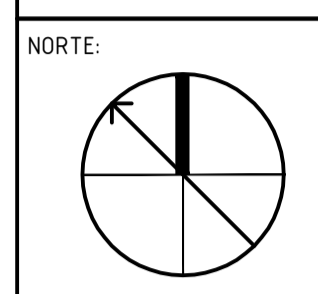
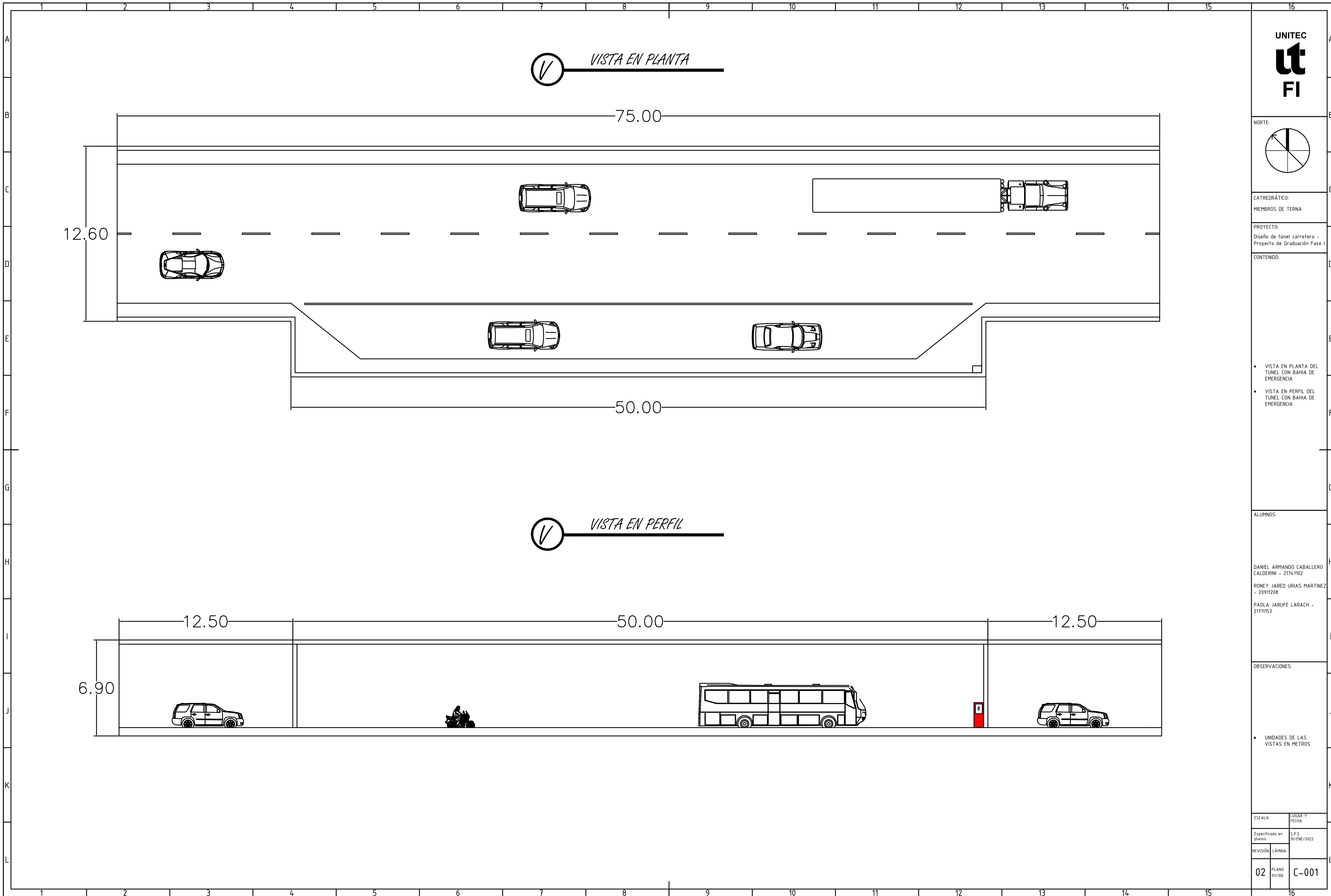
#9 @ 0.15 m



Losa Exterior (Pared)

#8 @ 0.15 m





CATREDRÁTICO:
 MIEMBROS DE TERNA

PROYECTO:
 Diseño de túnel carretero -
 Proyecto de Graduación Fase I

CONTENIDO:

- VISTA EN PLANTA DEL TUNEL CON BAHIA DE EMERGENCIA
- VISTA EN PERFIL DEL TUNEL CON BAHIA DE EMERGENCIA

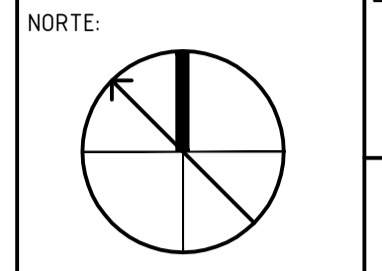
ALUMNOS:

DANIEL ARMANDO CABALLERO CALDERINI - 21741102
 RONEY JARED URIAS MARTINEZ - 20911208
 PAOLA JARUFE LARACH - 21711153

OBSERVACIONES:

- UNIDADES DE LAS VISTAS EN METROS

ESCALA:	LUGAR Y FECHA:
Especificada en planos	S.P.S 30/ENE/2022
REVISIÓN:	LÁMINA:
02	PLANO 01/100
	C-001



CATREDRÁTICO:
MIEMBROS DE TERNA

PROYECTO:
Diseño de túnel carretero -
Proyecto de Graduación Fase I

CONTENIDO:

- VISTA EN PLANTA DEL ALINEAMIENTO DEL TÚNEL
- VISTA EN PERFIL DEL ALINEAMIENTO DEL TÚNEL
- TABLAS DE VOLUMEN Y SECCIONES

ALUMNOS:

DANIEL ARMANDO CABALLERO CALDERINI - 21741102
RONEY JARED URIAS MARTINEZ - 20911208
PAOLA JARUFE LARACH - 21711153

OBSERVACIONES:

- UNIDADES DEL ALINEAMIENTO HORIZONTAL Y VERTICAL EN METROS
- UNIDADES DE LAS TABLAS DE VOLUMEN EN METROS CUBICOS
- UNIDADES DE LAS SECCIONES EN METROS

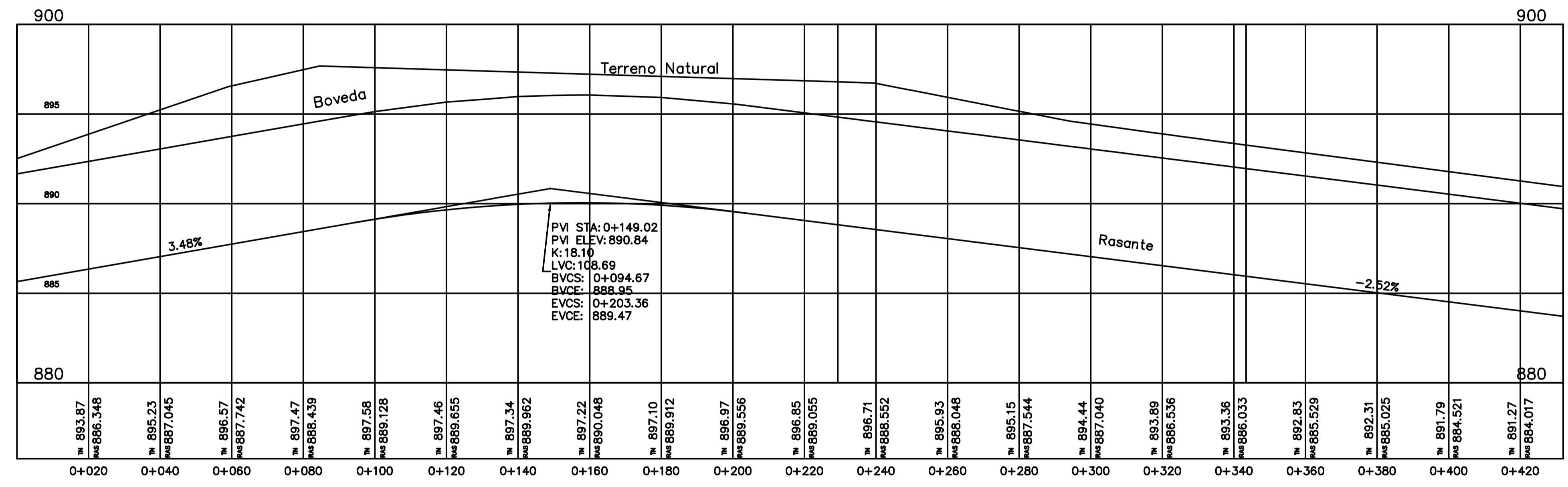
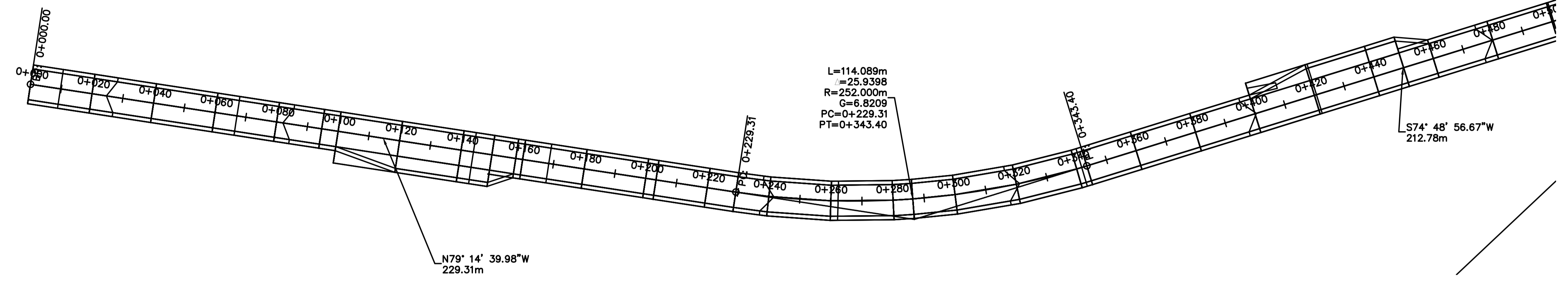
ESCALA: LUGAR Y FECHA:

Especificada en planos S.P.S 10/ENE/2022

REVISIÓN: LÁMINA:

03 PLANO 01/100 C-001

T TRAMO Y PERFIL



Escala Horizontal
1:500

Escala Vertical
1:100

S SECCIONES Y TABLAS

S SECCION TIPICA

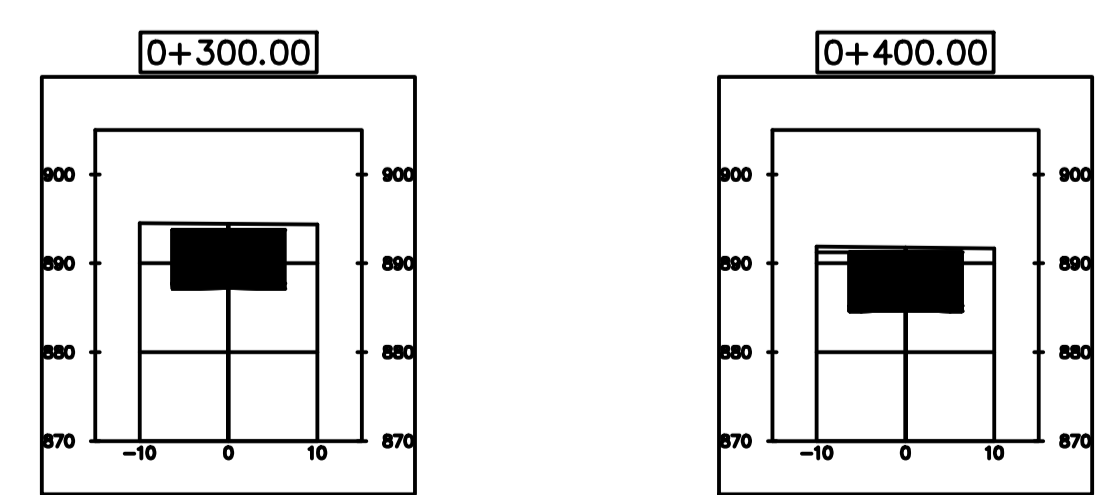
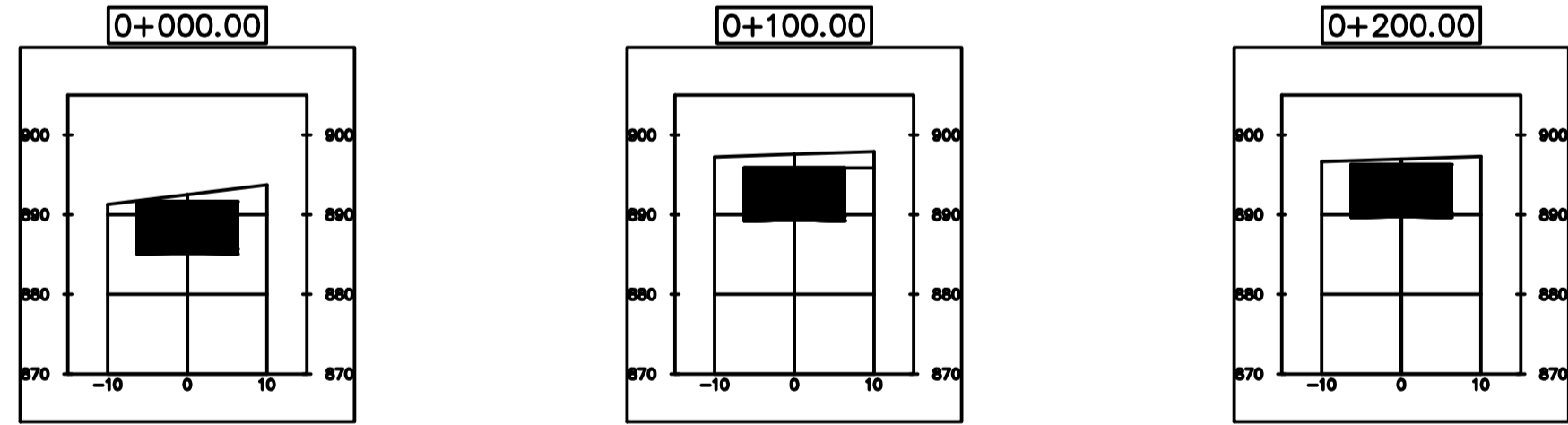


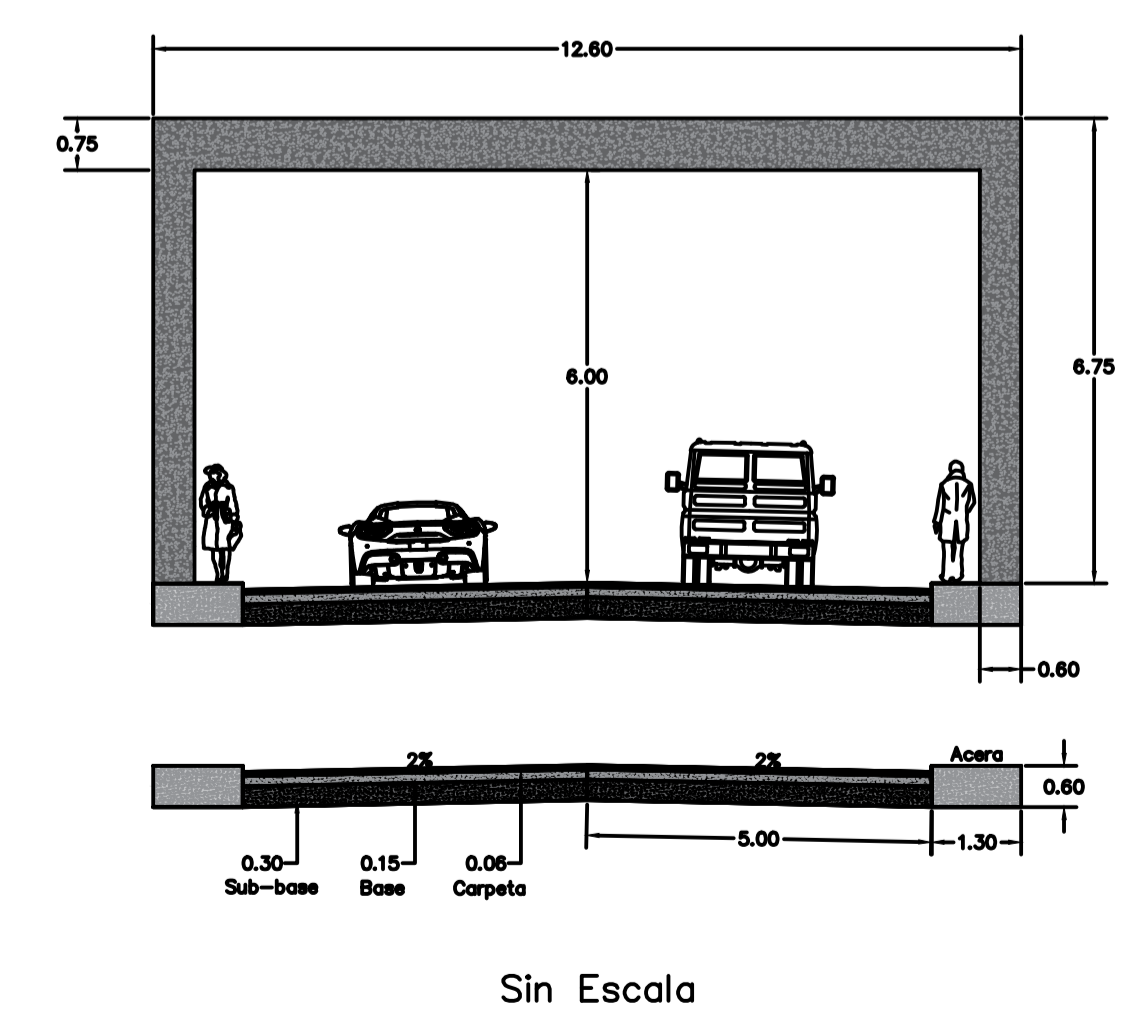
Tabla de Volumen Total

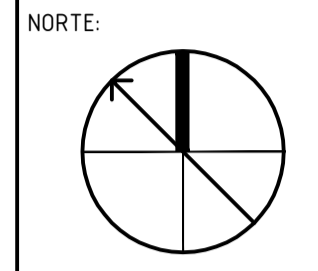
Estación	Area	Volumen	Volumen Acumulado
0+000.00	75.71	0.00	0.00
0+020.00	75.71	1514.28	1514.28
0+040.00	75.71	1514.28	3028.56
0+060.00	75.71	1514.28	4542.84
0+080.00	75.71	1514.28	6057.12
0+100.00	75.71	1514.28	7571.40
0+120.00	99.75	1754.68	9326.08
0+140.00	99.75	1995.08	11321.16
0+160.00	75.71	1754.68	13075.84
0+180.00	75.71	1514.28	14590.12
0+200.00	75.71	1514.28	16104.40
0+220.00	75.71	1514.28	17618.68
0+230.00	75.71	757.14	18375.82
0+240.00	75.71	757.14	19132.96
0+250.00	75.71	757.14	19890.10
0+260.00	75.71	757.14	20647.23
0+270.00	75.71	757.14	21404.37
0+280.00	75.71	757.14	22161.51
0+290.00	75.71	757.14	22918.65
0+300.00	75.71	757.14	23675.79

Tabla de Volumen Total

Estación	Area	Volumen	Volumen Acumulado
0+310.00	75.71	757.14	24432.93
0+320.00	75.71	757.14	25190.07
0+330.00	75.71	757.14	25947.21
0+340.00	75.71	757.14	26704.35
0+360.00	75.71	1514.28	28218.63
0+380.00	75.71	1514.28	29732.91
0+400.00	75.71	1514.28	31247.19
0+420.00	99.75	1754.68	33001.87
0+440.00	99.75	1995.08	34996.95
0+460.00	75.71	1754.68	36751.63
0+480.00	75.71	1514.28	38265.91
0+500.00	75.71	1514.28	39780.19
0+520.00	75.71	1514.28	41294.47
0+540.00	75.71	1514.28	42808.75
0+556.18	75.71	1225.40	44034.14

Escala Horizontal 1:500
Escala Vertical 1:250





CATREDRÁTICO:
MIEMBROS DE TERNA

PROYECTO:
Diseño de túnel carretero -
Proyecto de Graduación Fase I

CONTENIDO:

- VISTA EN PLANTA DEL ALINEAMIENTO DEL TÚNEL
- VISTA EN PERFIL DEL ALINEAMIENTO DEL TÚNEL
- TABLAS DE VOLUMEN Y SECCIONES

ALUMNOS:

DANIEL ARMANDO CABALLERO CALDERINI - 21741102
RONEY JARED URIAS MARTINEZ - 20911208
PAOLA JARUFE LARACH - 21711153

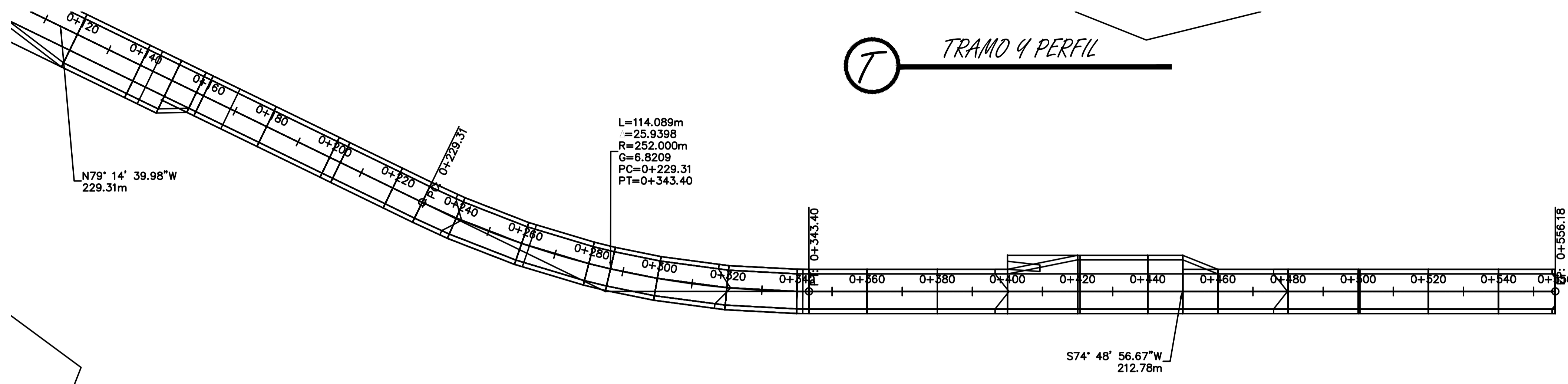
OBSERVACIONES:

- UNIDADES DEL ALINEAMIENTO HORIZONTAL Y VERTICAL EN METROS
- UNIDADES DE LAS TABLAS DE VOLUMEN EN METROS CUBICOS
- UNIDADES DE LAS SECCIONES EN METROS

ESCALA: LUGAR Y FECHA:
Especificada en planos S.P.S 10/ENE/2022

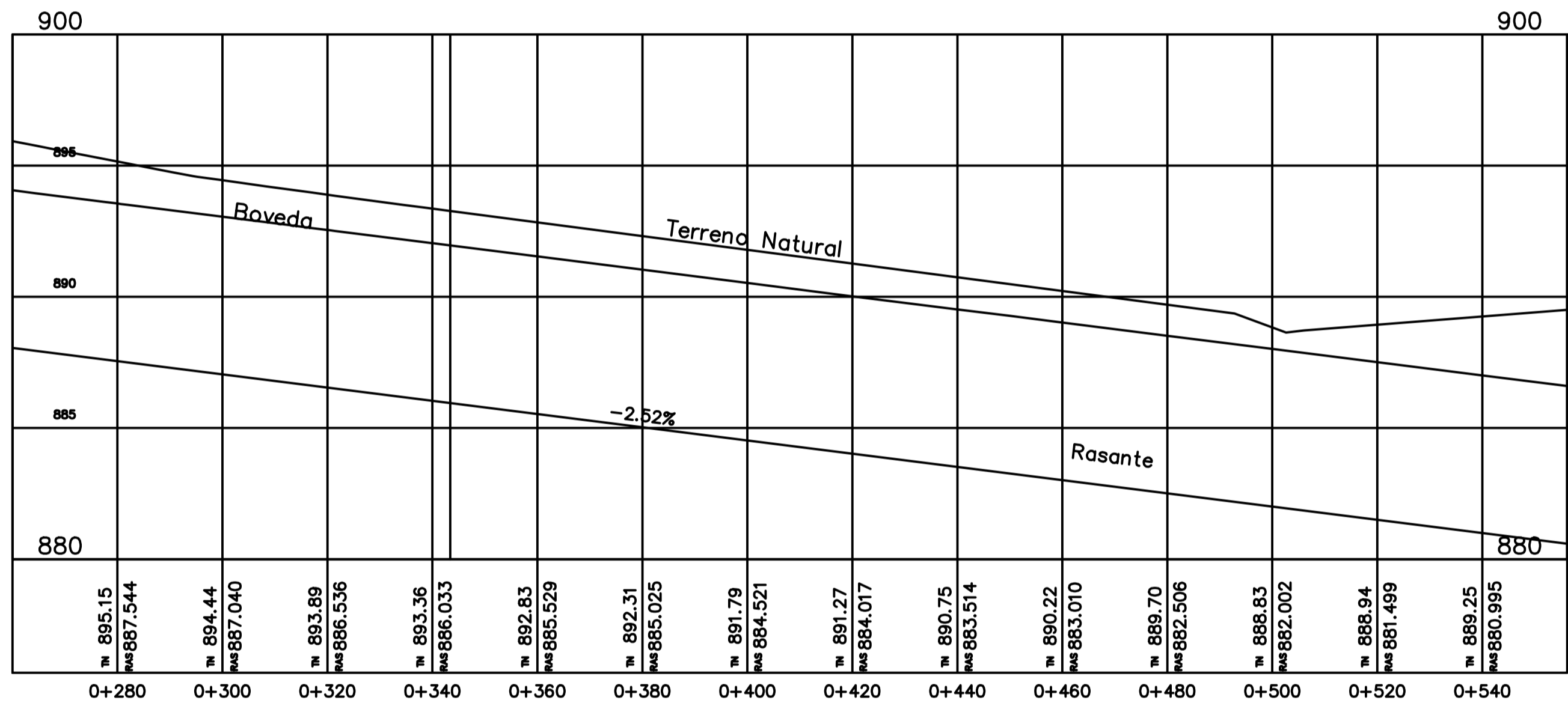
REVISIÓN: LÁMINA:
04 PLANO 01/100 C-001

TRAMO 4 PERFIL



Escala Horizontal
1: 500

Escala Vertical
1: 100



SECCIONES Y TABLAS

SECCION TIPICA

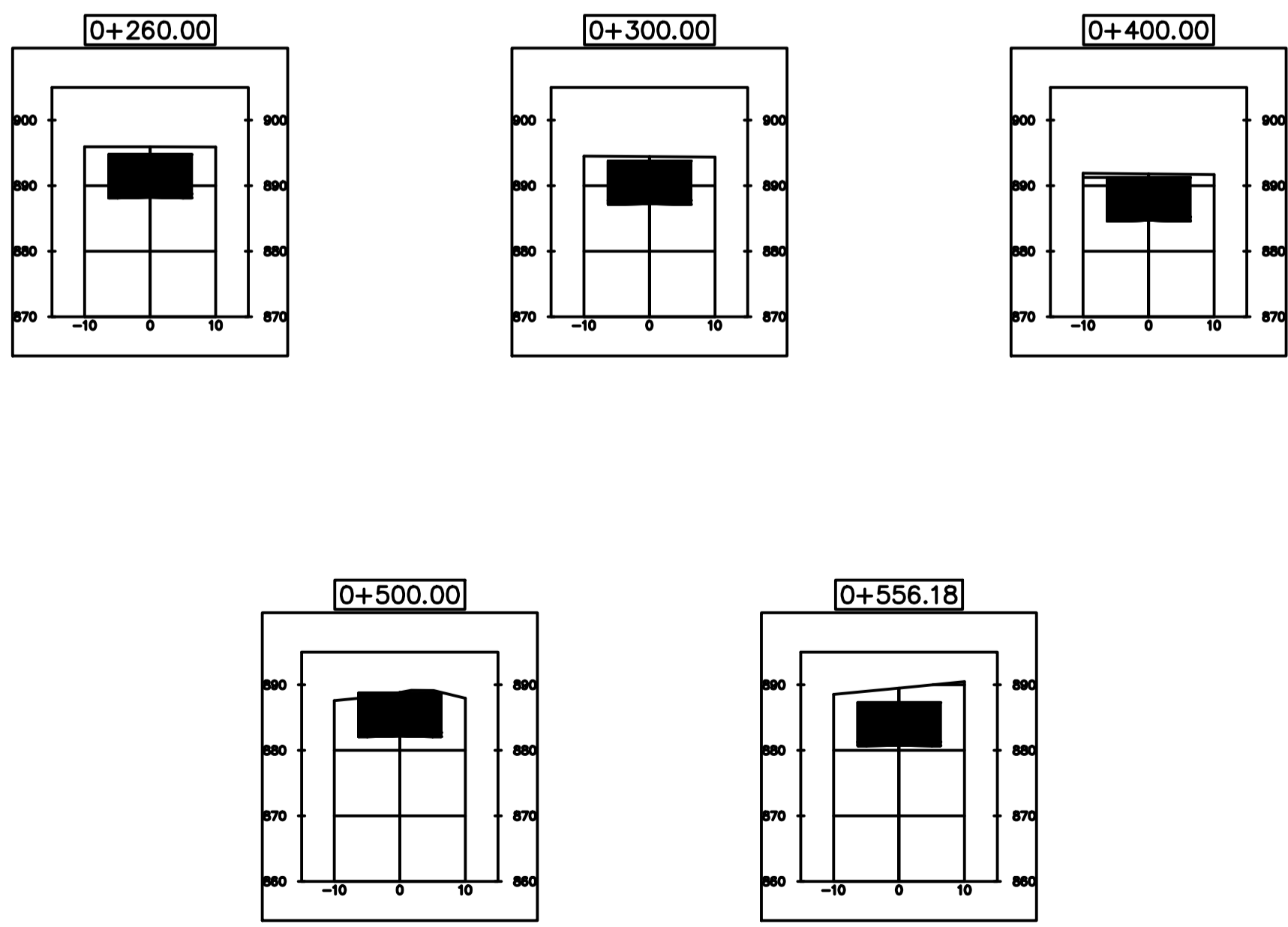


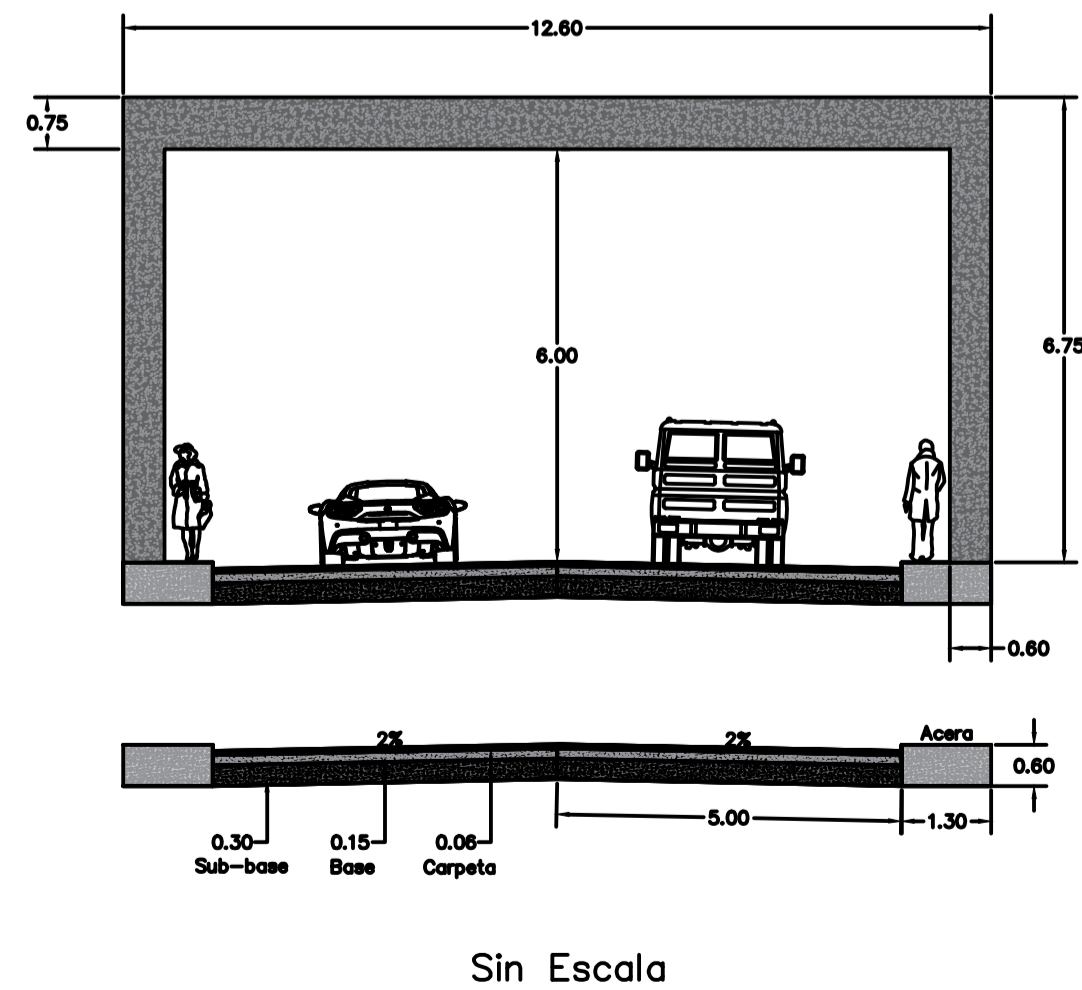
Tabla de Volumen Total

Estación	Area	Volumen	Volumen Acumulado
0+000.00	75.71	0.00	0.00
0+020.00	75.71	1514.28	1514.28
0+040.00	75.71	1514.28	3028.56
0+060.00	75.71	1514.28	4542.84
0+080.00	75.71	1514.28	6057.12
0+100.00	75.71	1514.28	7571.40
0+120.00	99.75	1754.68	9326.08
0+140.00	99.75	1995.08	11321.16
0+160.00	75.71	1754.68	13075.84
0+180.00	75.71	1514.28	14590.12
0+200.00	75.71	1514.28	16104.40
0+220.00	75.71	1514.28	17618.68
0+230.00	75.71	757.14	18375.82
0+240.00	75.71	757.14	19132.96
0+250.00	75.71	757.14	19890.10
0+260.00	75.71	757.14	20647.23
0+270.00	75.71	757.14	21404.37
0+280.00	75.71	757.14	22161.51
0+290.00	75.71	757.14	22918.65
0+300.00	75.71	757.14	23675.79

Tabla de Volumen Total

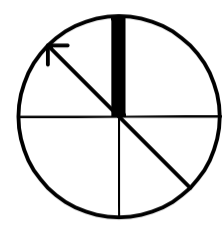
Estación	Area	Volumen	Volumen Acumulado
0+310.00	75.71	757.14	24432.93
0+320.00	75.71	757.14	25190.07
0+330.00	75.71	757.14	25947.21
0+340.00	75.71	757.14	26704.35
0+360.00	75.71	1514.28	28218.63
0+380.00	75.71	1514.28	29732.91
0+400.00	75.71	1514.28	31247.19
0+420.00	99.75	1754.68	33001.87
0+440.00	99.75	1995.08	34996.95
0+460.00	75.71	1754.68	36751.63
0+480.00	75.71	1514.28	38265.91
0+500.00	75.71	1514.28	39780.19
0+520.00	75.71	1514.28	41294.47
0+540.00	75.71	1514.28	42808.75
0+556.18	75.71	1225.40	44034.14

Escala Horizontal 1: 500
Escala Vertical 1: 250



Sin Escala

NORTE:



CATREDRÁTICO:
MIEMBROS DE TERNA

PROYECTO:
Diseño de túnel carretero -
Proyecto de Graduación Fase I

CONTENIDO:

- DIAGRAMA DE MASA Y CUADRO DE ALINEAMIENTO DEL TÚNEL CARRETERO

ALUMNOS:

DANIEL ARMANDO CABALLERO
CALDERINI - 21741102
RONEY JARED URIAS MARTINEZ
- 20911208
PAOLA JARUFE LARACH -
21711153

OBSERVACIONES:

- UNIDADES DE LAS ESTACIONES EN METROS
- UNIDADES DE VOLUMEN EN METROS CUBICOS

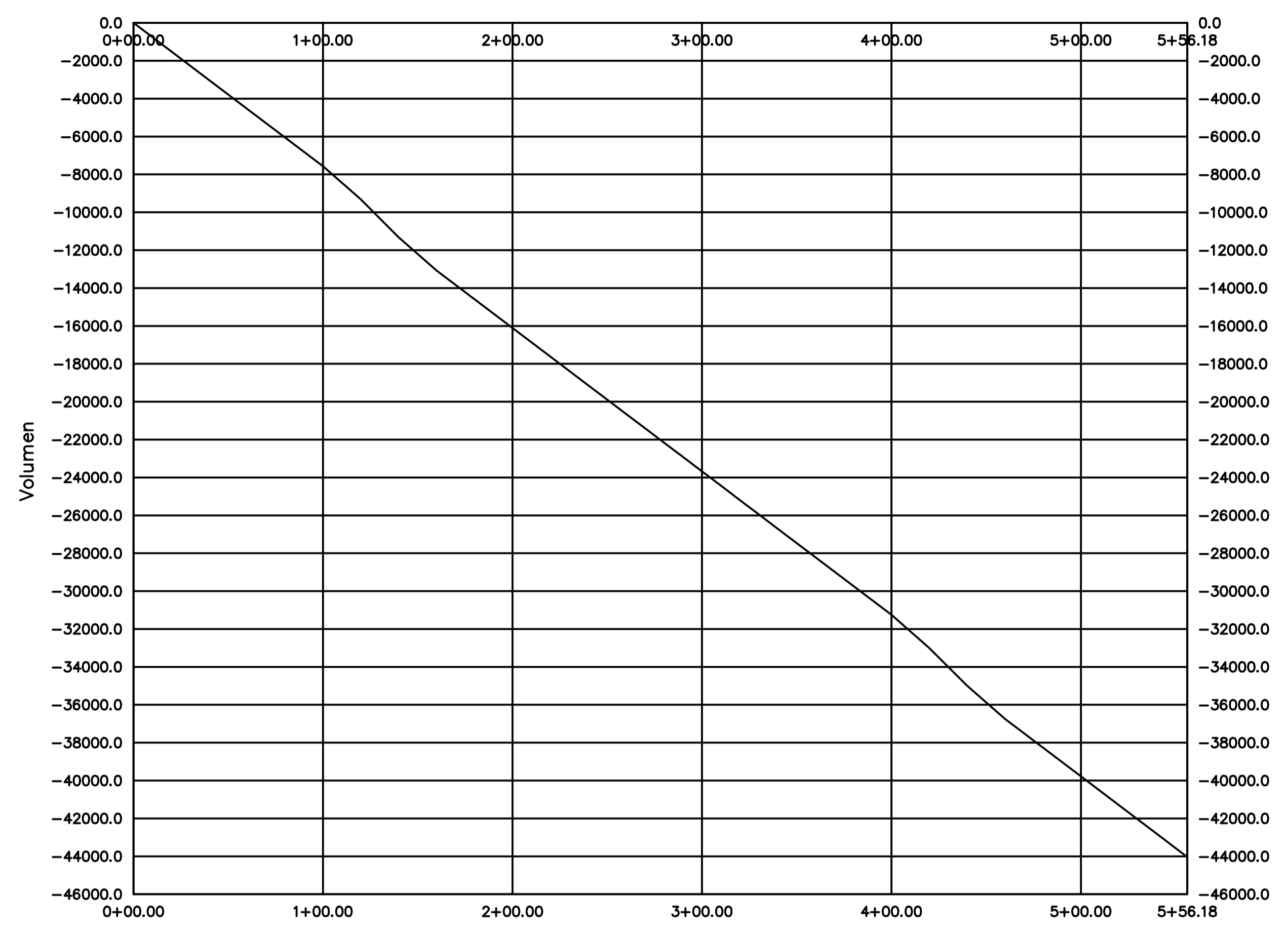
ESCALA: LUGAR Y FECHA:

Especificada en planos S.P.S 30/ENE/2022

REVISIÓN LÁMINA:

05 PLANO 01/100 C-001

D DIAGRAMA DE MASA

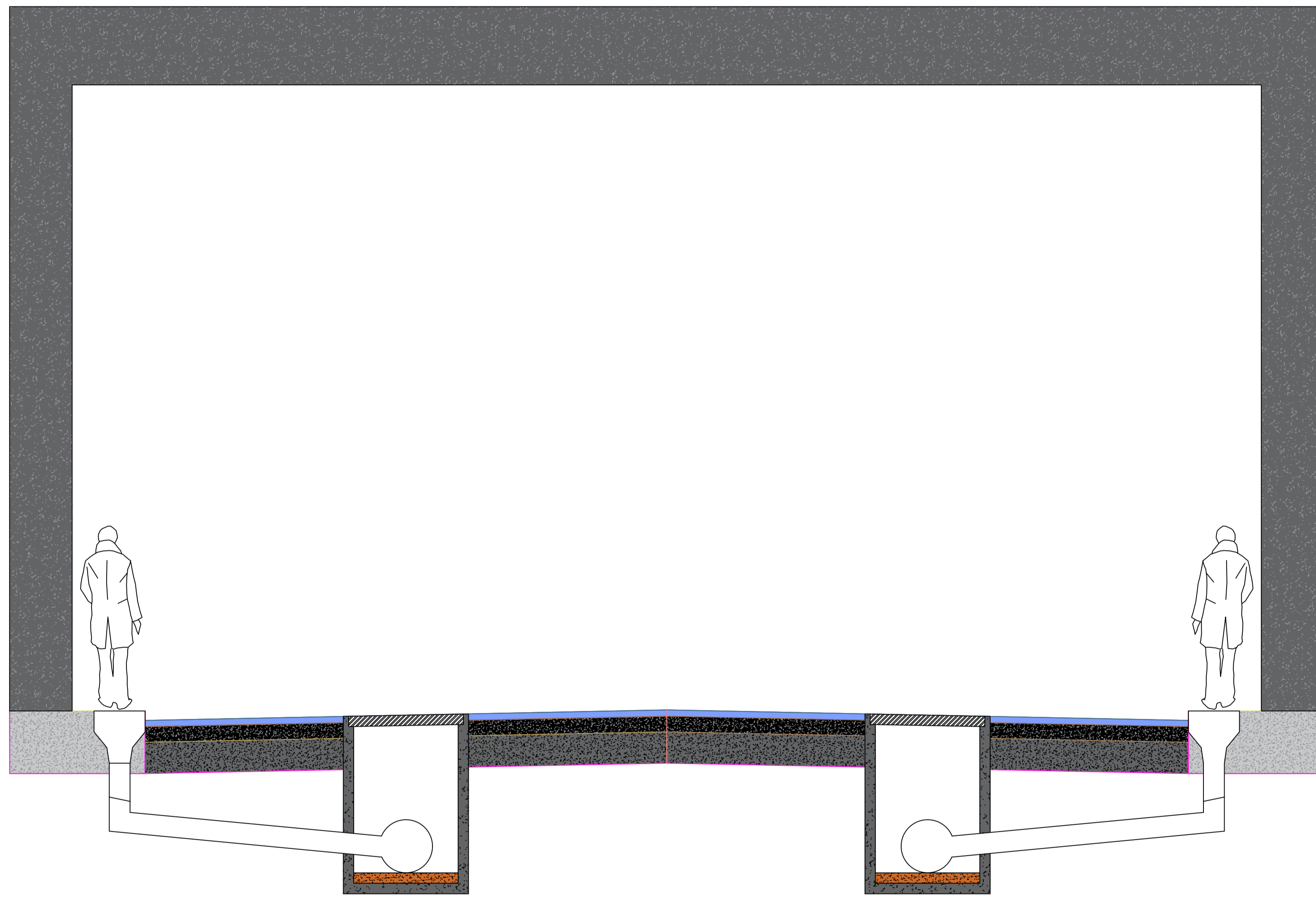


Estación

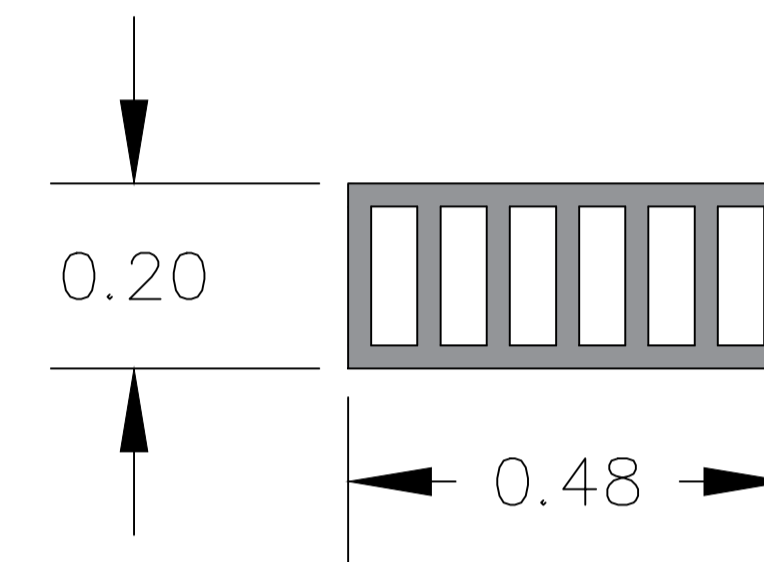
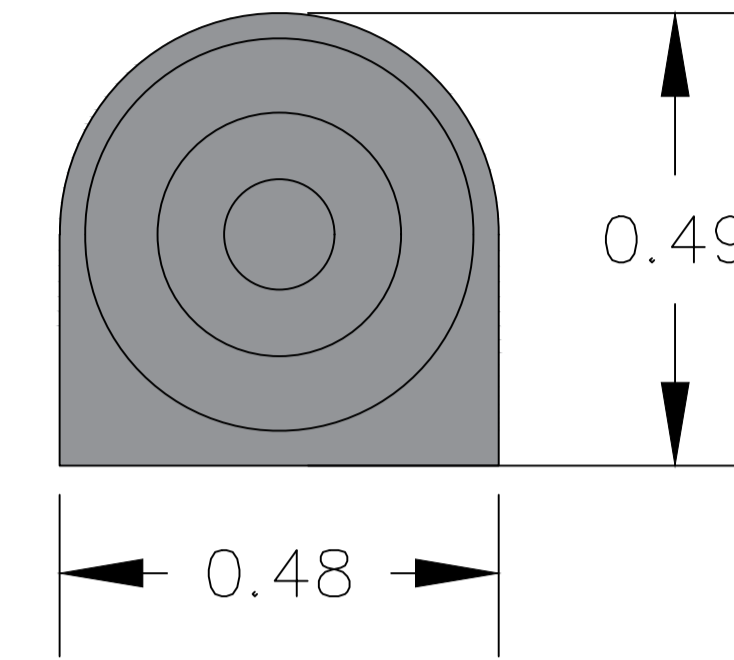
A CUADRO DE ALINEAMIENTO

CUADRO DE CONSTRUCCIÓN DE EJE						
Lado		Rumbo	Distancia	V	Coordenadas	
EST	PV				Y	X
			Lc = 000.00 ST = 000.00	PST=0+000.00	1,634,940.86	389,744.90
PST=0+000.00	PC=0+229.31	N 79°14'39.84" W	229.31	PC=0+229.31	1,634,940.86	389,744.90
PC=0+229.31	PT=0+343.40	S 87°47'8.52" W Δ = 25°56'23.28" izq Rc = 252.00	114.09 Lc = 113.12 ST = 058.04	PT=0+343.40 PI=0+287.35	1,634,983.65	389,519.61
PT=0+343.40	PST=0+556.18	S 74°48'56.52" W	212.78	PST=0+556.18	1,634,979.28	389,406.58
LONGITUD: 556.18 m						

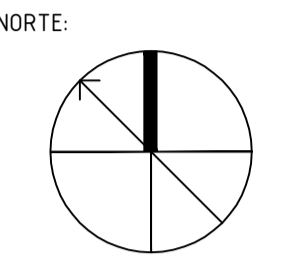
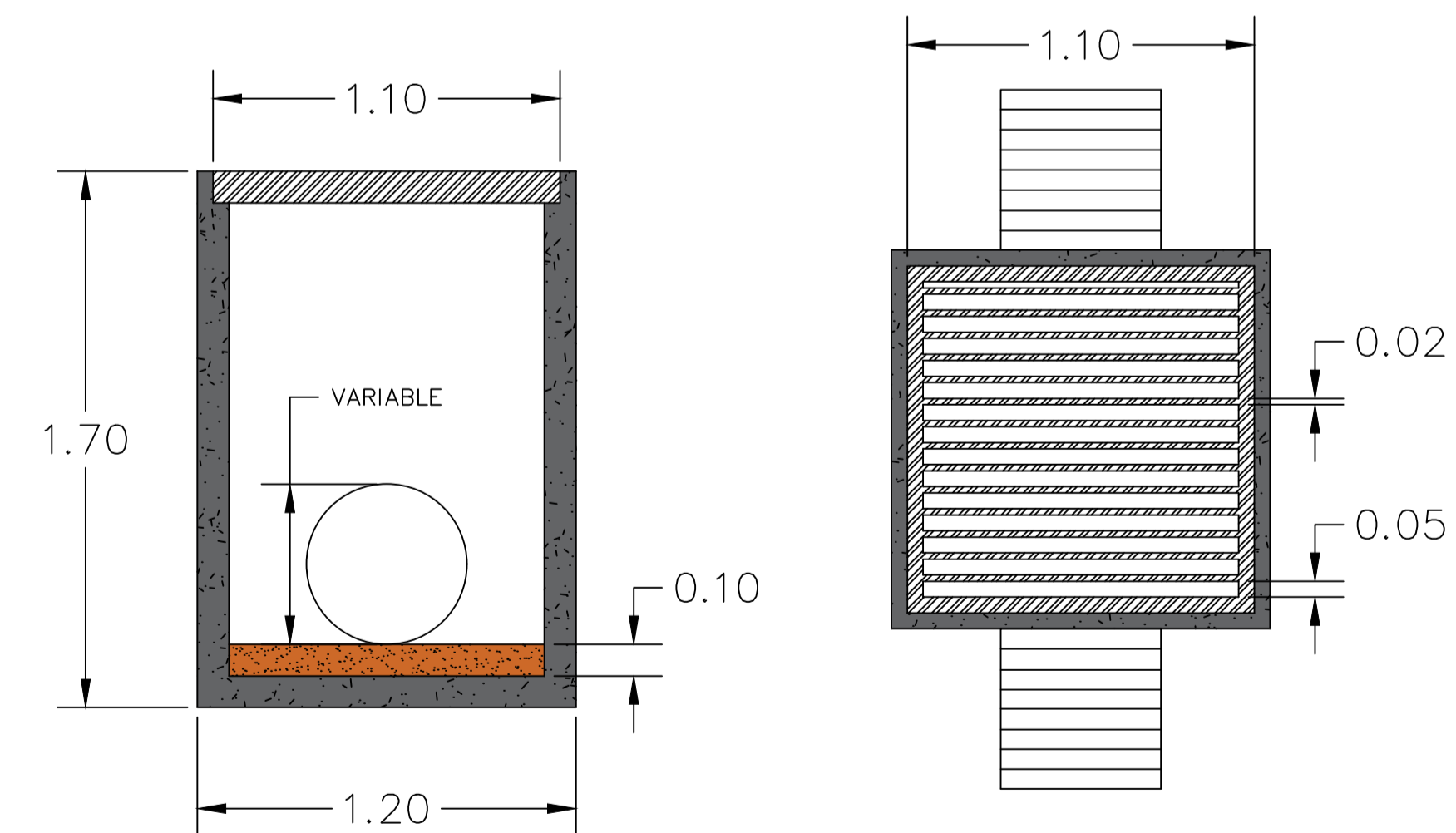
S SECCION TRANSVERSAL



B BOCA DE TORMENTA



P POZO DE VISITA



CATREDRÁTICO:
MIEMBROS DE TERNA

PROYECTO:
Diseño de túnel carretero -
Proyecto de Graduación Fase II

CONTENIDO:

- SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TÚNEL CON DRENAJE INCLUIDO
- VISTA EN PERFIL DEL TÚNEL CON BAHIA DE EMERGENCIA

ALUMNOS:

DANIEL ARMANDO CABALLERO CALDERINI - 21741102
RONEY JARED URIAS MARTINEZ - 20911208
PAOLA JARUFE LARACH - 21711153

OBSERVACIONES:

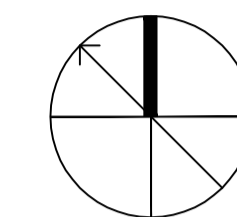
- UNIDADES DE LOS DETALLES Y LAS SECCIONES EN METROS

ESCALA: LUGAR Y FECHA:

Especificada en planos S.P.S 30/ENE/2022

REVISIÓN: LÁMINA:

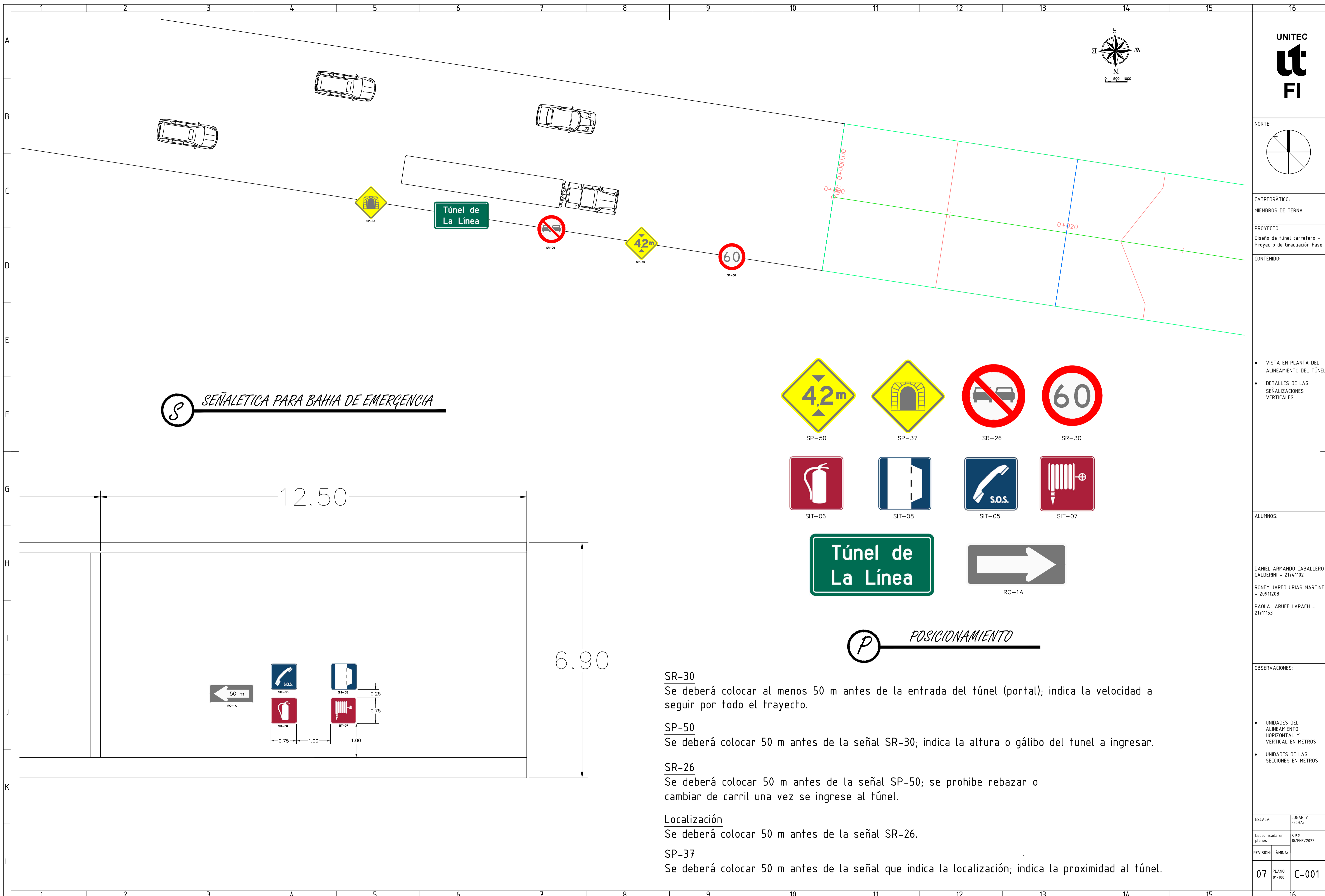
06 PLANO C-001



- VISTA EN PLANTA DEL ALINEAMIENTO DEL TÚNEL
- DETALLES DE LAS SEÑALIZACIONES VERTICALES

DANIEL ARMANDO CABALLERO CALDERINI - 21741102
RONEY JARED URIAS MARTINEZ - 20911208
PAOLA JARUFE LARACH - 21711153

- UNIDADES DEL ALINEAMIENTO HORIZONTAL Y VERTICAL EN METROS
- UNIDADES DE LAS SECCIONES EN METROS



S SEÑALETICA PARA BAHIA DE EMERGENCIA

SP-50

SP-37

SR-26

SR-30

SIT-06

SIT-08

SIT-05

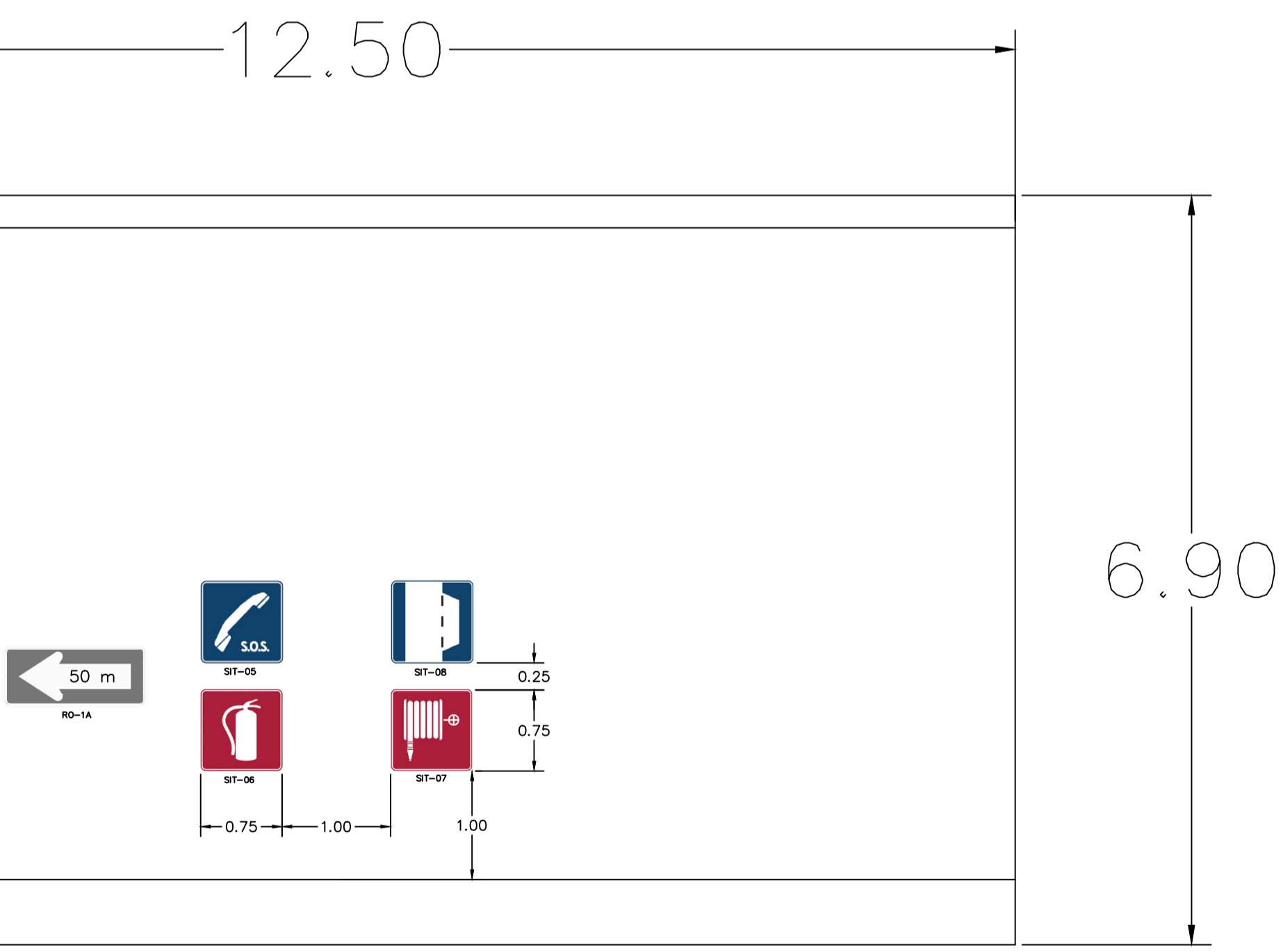
SIT-07

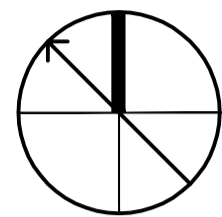
RO-1A

Túnel de La Línea

P POSICIONAMIENTO

- SR-30**
Se deberá colocar al menos 50 m antes de la entrada del túnel (portal); indica la velocidad a seguir por todo el trayecto.
- SP-50**
Se deberá colocar 50 m antes de la señal SR-30; indica la altura o gálibo del túnel a ingresar.
- SR-26**
Se deberá colocar 50 m antes de la señal SP-50; se prohíbe rebazar o cambiar de carril una vez se ingrese al túnel.
- Localización**
Se deberá colocar 50 m antes de la señal SR-26.
- SP-37**
Se deberá colocar 50 m antes de la señal que indica la localización; indica la proximidad al túnel.

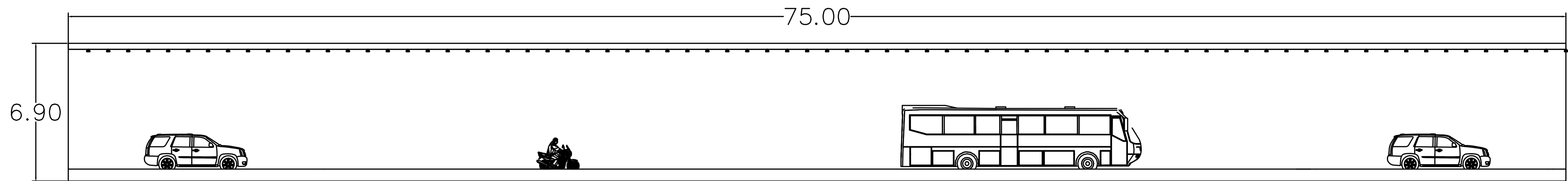




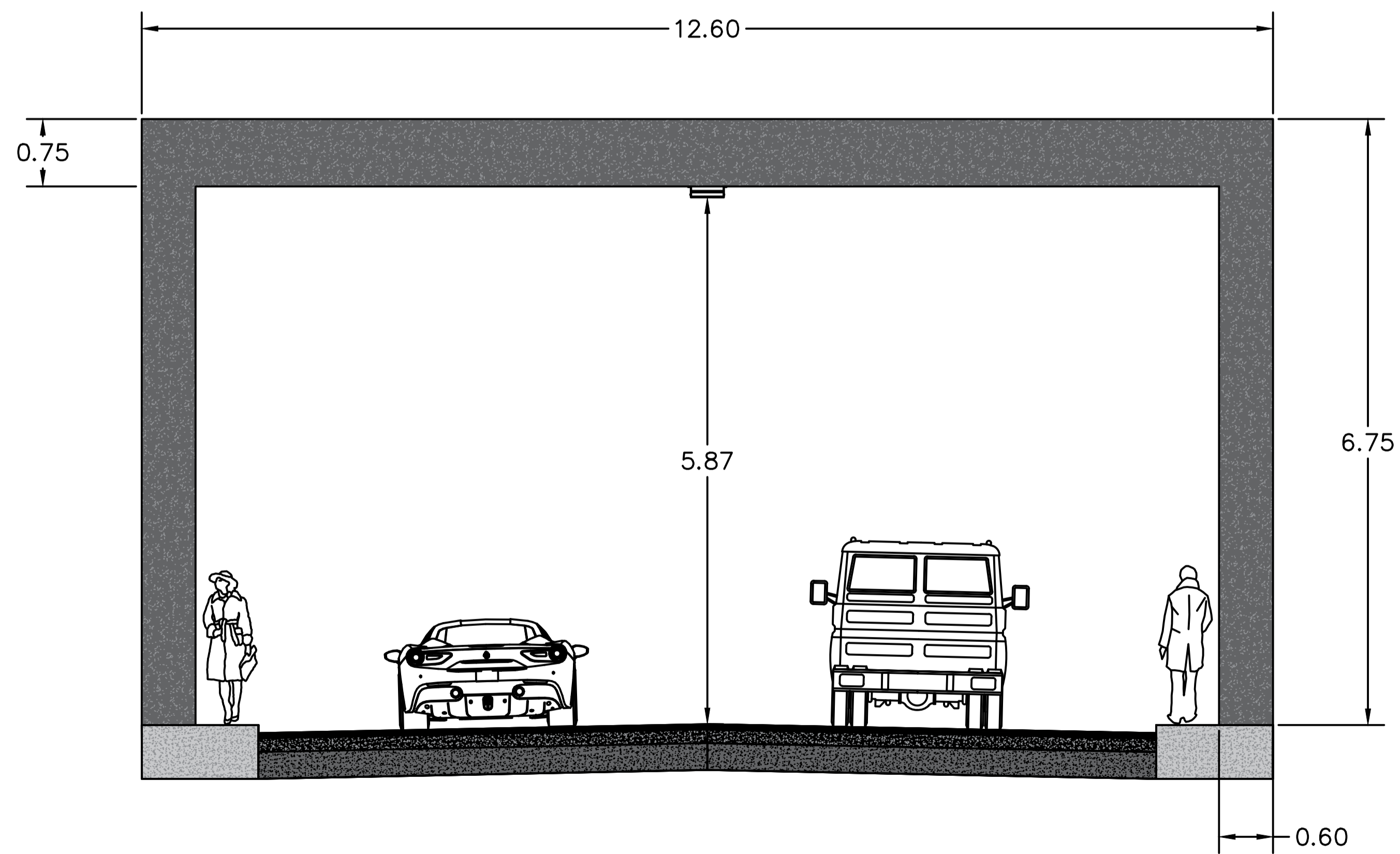
- VISTA EN PERFIL DEL TÚNEL CON LUMINARIAS
- DETALLES Y DIMENSIONES DE LAS LUMINARIAS

DANIEL ARMANDO CABALLERO
CALDERINI - 21741102
RONEY JARED URIAS MARTINEZ
- 20911208
PAOLA JARUFE LARACH -
21711153

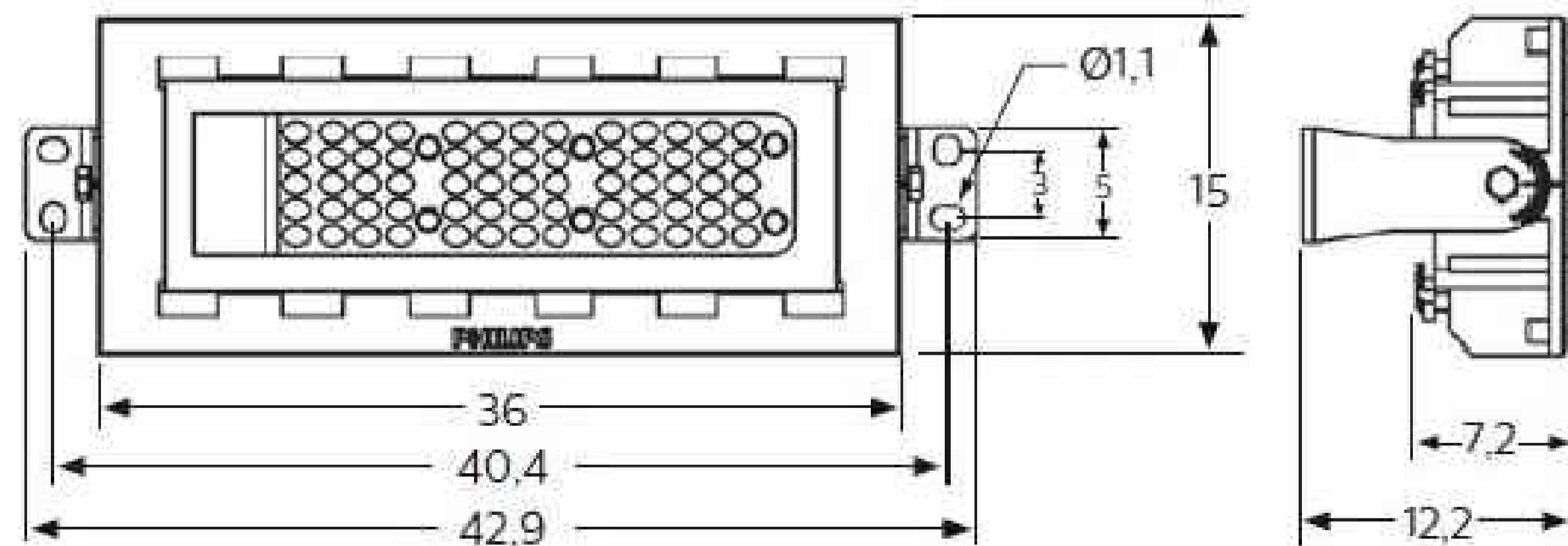
- UNIDADES DE LOS DETALLES EN CENTÍMETROS
- UNIDADES DE LAS SECCIONES Y LAS VISTAS EN METROS



Luminarias espaciadas de manera simétrica a 1 metro de longitud



Unidades en metros



Unidades en centímetros

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (2017). LRFD road tunnel design and construction guide specifications.

Caballero, C., Raudales, L., & Funez, M. (2014). Zonificación de Suelos de la ciudad de San Pedro Sula, Cortés. <https://sites.google.com/site/zonificacionsuelossps/home>

FHIS. (1990). Reseña Histórica del FHIS.

INE. (2018). Instituto General de Estadística. <https://www.ine.gob.hn/V3/imag-doc/2019/08/San-Pedro-Sula-Cortes.pdf>

MTC. (2016). Manual de Carreteras—Tuneles, Muros y Obras Complementarias—Peru.pdf.

NHI. (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels.pdf.

SOPTRAVI. (1996a). Manual de Carreteras Tomo I Soptravi.pdf.

SOPTRAVI. (1996b). Manual de Carreteras Tomo III Soptravi.pdf.

SOPTRAVI. (2012). Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda (SOPTRAVI).

https://web.archive.org/web/20121009170340/http://www.gob.hn/portal/poder_ejecutivo/secretarias/soptravi/

VI. CONCLUSIONES

- 1) Con respecto a los ensayos in situ y de laboratorio a aplicar, se determinó mediante el cuestionario, en específico el que fue dirigido a los ingenieros civiles expertos, que los ensayos más representativos a realizar para así poder determinar las características del terreno a utilizar para así poder llevar a cabo la construcción de un túnel carretero son el ensayo de Penetración Estándar (SPT), los Sondeos Mecánicos, Calicatas Eléctricas, la Sísmica de Refracción y Reflexión, el Ensayo Triaxial, Peso Específico, Límites de Atterberg, entre otros. Mediante los ensayos anteriormente mencionados es posible determinar si una zona de la ciudad de San Pedro Sula cumple con los requisitos geotécnicos necesarios para poder implementarse un túnel carretero o cualquier obra subterránea; además de también poder identificar las propiedades del terreno es posible también encontrar malformaciones, fallas geológicas y acuíferos que más adelante pueden impactar en el desarrollo de la obra. Por medio de entrevistas, asesorías y otros medios, se logró identificar el sector de San Pedro Sula con mayor probabilidad para ejecución de este tipo de obras civiles, el sector sur de San Pedro Sula tiene las capacidades requeridas para implementar este tipo de obras debido a su inusual topografía en comparación con los demás sectores de la ciudad.
- 2) Las normativas internacionales que se utilizaron fueron recopiladas a través de las recomendaciones de los ingenieros civiles expertos. En el caso de las nacionales, no se obtuvieron datos relevantes debido a que en Honduras no existe una norma para este tipo de obras subterráneas, sin embargo, debido a que el diseño de túneles carreteros no se desvía mucho del diseño de carreteras como tal se optó por utilizar tanto el "Manual de Carreteras de la Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda (SOPTRAVI)" de Honduras y el "Manual de la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA)" para cubrir el espacio del diseño geométrico. Las normativas internacionales recomendadas y utilizadas en otros estudios, así mismo, implementadas en el diseño propuesto, son las siguientes: "LRFD Road Tunnel Design and Construction Guide Specifications" de Estados Unidos y además también se recomendó utilizar el "Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC)".

- 3) A través del cuestionario aplicado, se conocieron las recomendaciones y características de los túneles carreteros según los ingenieros civiles expertos de Honduras, estos indicaron que las dimensiones de la estructura deben ser las siguientes: un mínimo de dos carriles por túnel, un ancho mínimo de 5 metros por carril, aceras para los peatones de al menos 1 metro de ancho y un gálibo (altura) de al menos 6 metros. El material que los ingenieros consideraron adecuado para utilizar en la construcción de un túnel carretero fue el concreto hidráulico, de los seis ingenieros que fueron encuestados todos eligieron el mismo material resultando en un valor de 100%. La sección típica a aplicar se recomendó que fuera rectangular a pesar que se eligió la sección semicircular como la más adecuada, esto se cambió al final tomando en cuenta las dificultades de llevar a cabo dicha sección en la etapa constructiva. Entre los procedimientos y maquinaria a aplicar se recomendó el uso de tuneladoras TBM y perforadoras, aunque tomando en cuenta que esta maquinaria es un poco inaccesible en estos momentos se decidió optar por la típica maquinaria pesada como lo son las excavadoras y retroexcavadoras, en cuanto a los procedimientos se recomendó utilizar prefabricados en vez de colado en sitio. El mantenimiento se concluyó que sería cada seis meses lo que corresponde a dos veces por año.
- 4) Con respecto a las necesidades de los usuarios, que en este caso serían los habitantes de la ciudad de San Pedro Sula, se determinó mediante el cuestionario que el 89% de los encuestados está de acuerdo con la actual señalización que posee el túnel de la 27 y 28 calle ubicado en el bulevar del sur, y el 73% establece que la iluminación nocturna es adecuada mientras que el 68% indica que la iluminación diurna es adecuada también. Para futuros diseños, el 96% de los encuestados consideran adecuada la inclusión de un carril o bahía de emergencia para estacionar vehículos en caso de accidentes automovilísticos, también que el carril debe tener un ancho mínimo de 4 a 5 metros para garantizar espacio suficiente. Los habitantes recomendaron dos carriles por túnel y cada carril tener un ancho mínimo de 3.50 a 5 metros. El 92% de los encuestados consideran que deben de seguirse implementando este tipo de obras civiles en la ciudad de San Pedro Sula, y si es posible, alrededor del país de Honduras como tal.

- 5) Según los encuestados, el contenido imprescindible que debe comprender el manual para el diseño preliminar de túneles carreteros son generalidades, estudios geológicos - geotécnicos, clasificación geomecánica, sostenimiento y revestimiento, diseño geométrico y estructural, señalización, drenaje, iluminación, mantenimiento y planos, por lo cual cada uno de estos temas se incluyó dentro del Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras, el cual consiste de once capítulos en total, tomando en cuenta que el capítulo nueve, diez y parte del once serán presentados en Fase II.

VII. RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda a los ingenieros civiles, empresas constructoras y a la Municipalidad de San Pedro Sula realizar estudios de carácter geotécnico a lo largo de toda la ciudad para poder recopilar información referente a las características y propiedades del terreno que puedan tomarse en cuenta durante la etapa de planeación para este tipo de obras civiles, esto con el fin de contar con información relevante y actualizada para la correcta toma de decisiones.
- 2) Debido a que este tipo de estructuras apenas se están empezando a implementar en el país, no se encuentran normas nacionales, por lo que se sugiere utilizar las normativas aplicadas en países cercanos, como lo pueden ser México, Perú y Estados Unidos. Además de tomar el ejemplo y la opinión de expertos que previamente realizaron diseños utilizando las mismas normativas, así mismo, todo tipo de recomendación brindada, se debe realizar una revisión basándose en las normas ya existentes.
- 3) Se invita a los diseñadores a obtener información directamente de expertos en el diseño de túneles carreteros ya que facilitan el uso de las normativas extranjeras, la aplicación de la maquinaria adecuada, los procedimientos constructivos y debido a su experiencia, proveen información valiosa con respecto a los diseños realizados por estos mismos. Además de contar siempre con los manuales y las normativas internacionales de mayor relevancia hasta la fecha.
- 4) Se aconseja realizar encuestas dirigidas hacia las personas que utilizarían este tipo de estructuras para conocer sus necesidades y así obtener información de valor con respecto a si es factible un túnel carretero o no en dicho lugar, así mismo, obtener las especificaciones que deben tener como ser las dimensiones, formas, señalización, complementos, entre otros.
- 5) Se sugiere expandir el contenido del manual, añadiendo información relevante de otros sitios de Honduras en comparación con el actual manual que solamente hace referencia a la ciudad de San Pedro Sula, esto con el fin de llegar a aplicar la metodología de construcción de túneles carreteros no solo en áreas urbanas sino rurales también.

VIII. APLICABILIDAD

El Manual de Diseño Preliminar de Túneles de Carretera en San Pedro Sula, Honduras, puede ser aplicado con el fin de diseñar e implementar túneles carreteros con sección típica en dicha ciudad, ya que provee las normativas tanto nacionales como internacionales a tomar en cuenta para llevar a cabo los estudios y ensayos necesarios previo a su construcción, la maquinaria a utilizar, las dimensiones mínimas a tomar en cuenta, y ejemplos de las señalizaciones y luminarias a aplicar tanto en el interior como en el exterior de la estructura. A continuación, se determinan los individuos que pueden hacer uso de dicho manual:

- 1) La Municipalidad de San Pedro Sula, al igual que empresas constructoras que busquen participar en la construcción de proyectos referentes a túneles carreteros u otro tipo de obras subterráneas con el fin de ampliar la actual red vial del país y beneficiar a la población.
- 2) Ingenieros civiles y arquitectos que se vean involucrados en el diseño de túneles carreteros, por lo cual se les facilitaría el uso del manual ya que la información necesaria para realizar el diseño con el material conocido como concreto hidráulico se encuentra en un solo documento.
- 3) A estudiantes de la carrera de ingeniería civil y/o interesados en el área de la construcción que busquen incrementar sus conocimientos con respecto a una nueva metodología de construcción de túneles que no se haya visto aun en el país de Honduras.

La creación de este manual brinda la posibilidad de implementar y crear conciencia de una novedosa estructura en la ciudad de San Pedro Sula, ya que previo a el mismo, no existía un documento en toda Honduras que explicara lo que es un túnel carretero, mucho menos las normas creadas específicamente para el mismo y el procedimiento para correctamente diseñar uno, a pesar de que dichas estructuras ya existen en las ciudades más desarrolladas de Honduras como lo son San Pedro Sula y Tegucigalpa. Por consiguiente, este manual también sirve para introducir la estructura y sus beneficios a corto y largo plazo, además de motivar a seguir expandiendo más diseños con respecto a materiales, maquinaria, estudios, etc.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO. (2017). *LRFD road tunnel design and construction guide specifications*.
- Alcaldía Municipal. (2018). *Informe de Tres Años de Gestion*.
- APEN. (2020). *Qué es Microsoft PowerPoint | Apen: Soluciones informáticas*. <https://apen.es/glosario-de-informatica/microsoft-powerpoint/>
- Arkiplus. (2016). *Hastiales en minería. Arkiplus*. <https://www.arkiplus.com/hastiales-en-mineria/>
- ASALE, R.-, & RAE. (2020a). *Berma | Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/berma>
- ASALE, R.-, & RAE. (2020b). *Encuesta | Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/encuesta>
- ASALE, R.-, & RAE. (2020c). *Nicho | Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/nicho>
- ASALE, R.-, & RAE. (2020d). *Vereda | Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/vereda>
- Baquedano, K. (2021). *PressReader.com—Digital Newspaper & Magazine Subscriptions*. <https://www.pressreader.com/honduras/diario-la-prensa/20210210/281792811721846>
- Caballero, C., Raudales, L., & Funez, M. (2014). *Zonificación de Suelos de la ciudad de San Pedro Sula, Córtes*. <https://sites.google.com/site/zonificacionsuelosps/home>
- Caballero, G. (2021). *Curva Horizontal | PDF | Curva | Topografía*. Scribd. <https://es.scribd.com/doc/99870178/Curva-Horizontal>
- Calidonio, A. (2016). *Diseño de túneles en 27 y 28 calle, empezaremos a construir en dos meses. +#OBRAS +#DESARROLLO #PASOAPASO #SPSAvanza* <https://t.co/YDDrfBBP6v> [Tweet]. @armandocalisps. <https://twitter.com/armandocalisps/status/763036513688915968/photo/2>
- CENISS. (2021). *CENISS | Centro Nacional de Información del Sector Social*. <https://www.ceniss.gob.hn/roi/insep.html>
- ConceptoDefinicion. (2021a). *¿Qué es Bóveda? » Su Definición y Significado [2021]. Concepto de - Definición de*. <https://conceptodefinicion.de/boveda/>
- ConceptoDefinicion. (2021b). *¿Qué es Concreto? » Su Definición y Significado [2021]. Concepto de - Definición de*. <https://conceptodefinicion.de/concreto/>
- ConceptoDefinicion. (2021c). *¿Qué es Google? » Su Definición y Significado 2021. Concepto de - Definición de*. <https://conceptodefinicion.de/google/>
- ConceptoDefinicion. (2021d). *¿Qué es Roca? » Su Definición y Significado [2021]. Concepto de - Definición de*. <https://conceptodefinicion.de/roca/>

DEARKITECTURA. (2019). *¿Que es el peralte? - El peralte en las carreteras*.
<http://dearkitectura.blogspot.com/2012/05/que-es-el-peralte-el-peralte-en-las.html>

Definicion.de. (2012). *Definición de ventilación—Definicion.de*. Definición.de.
<https://definicion.de/ventilacion/>

Definicion.de. (2017). *Definición de carril—Definicion.de*. Definición.de. <https://definicion.de/carril/>

Definicion.de. (2018). *Definición de calzada—Definicion.de*. Definición.de. <https://definicion.de/calzada/>

DiccionArqui. (2016). Significado y Definición de Revestimiento | Diccionario de Arquitectura. *DiccionArqui*. <https://diccionarqui.com/diccionario/revestimiento/>

DOBLEVIA. (2007). Curvas Circulares Simples. *Doble Vía*.
<https://doblevia.wordpress.com/2007/03/19/curvas-circulares-simples/>

EcuRED. (2021a). *Iluminación—EcuRed*. <https://www.ecured.cu/Iluminaci%C3%B3n>

EcuRED. (2021b). *Túnel—EcuRed*. <https://www.ecured.cu/T%C3%BAnel>

El Heraldo, D. (2021a). *Así conectarán paso a desnivel y túnel con el bulevar Suyapa*. Diario El Heraldo.
<https://www.elheraldo.hn/tegucigalpa/1487407-466/conexion-paso-desnivel-tunel-bulevar-suyapa>

El Heraldo, D. (2021b). *Habilitan paso por el túnel de La Reforma en la capital de Honduras*. Diario El Heraldo. <https://www.elheraldo.hn/tegucigalpa/1438219-466/habilitan-paso-por-el-túnel-de-la-reforma-en-la-capital-de>

El Pais, D. (2018). *Nuevo túnel permite pasar a la 27 calle sin hacer alto*.
<https://www.elpais.hn/2018/01/22/nuevo-tunel-permite-pasar-la-27-calle-sin-alto/>

ESAN. (2018). *Microsoft Project: Su aplicación en la gestión de proyectos*.
<https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2018/10/microsoft-project-su-aplicacion-en-la-gestion-de-proyectos/>

es.BIM. (2020). Civil 3D, de Autodesk ¿qué es Civil 3D? *Espacio BIM*. <https://www.espaciobim.com/civil-3d>

Fernández, Y. (2020). *Qué es Canva, cómo funciona y cómo usarlo para crear un diseño*. Xataka.
<https://www.xataka.com/basics/que-canva-como-funciona-como-usarlo-para-crear-diseno>

FHIS. (1990). *Reseña Historica del FHIS*.

Gil, D. (2017). *PROYECTO DE EJECUCIÓN DE TÚNEL CARRETERO EN OYÓN, PERÚ*. 377.

Glosario Geologia. (2012). *Diaclasa (Geología)* (Spanish/English/French) [Text]. glosarios@servidor-alicante.com; glosarios@servidor-alicante.com. <https://glosarios.servidor-alicante.com/geologia/diaclasa>

Gonzales, A. (2021). *Alcaldía apuesta por túneles en la infraestructura vial de la capital*. Diario El Heraldo. <https://www.elheraldo.hn/tegucigalpa/1473090-466/alcaldia-tuneles-infraestructura-vial-tegucigalpa->

- Guzman, J. (2021). ¿Qué es Google Forms y para qué sirve? *Juan Sebastian Guzman*. <https://juansguzman.com/que-es-google-forms-y-para-que-sirve/>
- Hudiel, S. (2011). *Unidad-ii_curvas-verticales_2011.pdf*. https://sjnavarro.files.wordpress.com/2011/08/unidad-ii_curvas-verticales_2011.pdf
- INE. (2018). *Instituto General de Estadística*. <https://www.ine.gob.hn/V3/imag-doc/2019/08/San-Pedro-Sula-Cortes.pdf>
- La Tribuna, D. (2019). Inician construcción de túnel en La Hacienda. *Diario La Tribuna*. <https://www.latribuna.hn/2019/03/02/inician-construccion-de-tunel-en-la-hacienda/>
- Lopez, M., & Gutierrez, L. (2021). *Túneles en Colombia: De la modernización a la infraestructura resiliente | CAF*. <https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2021/05/tuneles-en-colombia-de-la-modernizacion-a-la-infraestructura-resiliente/>
- Mendez, A. (2014). *Guia-blackboard-del-estudiante.pdf*. <https://gurabo.uagm.edu/sites/default/files/uploads/Educacion-distancia/Estudiantes/guia-blackboard-del-estudiante.pdf>
- Microsoft. (2013). *Tareas básicas en Word*. https://support.microsoft.com/es-es/office/tareas-b%C3%A1sicas-en-word-87b3243c-b0bf-4a29-82aa-09a681999fdc#ID0EBD=Office_2013
- Microsoft. (2021). *Aplicaciones de Office—Service Descriptions*. <https://docs.microsoft.com/es-es/office365/servicedescriptions/office-applications-service-description/office-applications>
- MOTORGIGA. (2021a). *PENDIENTE - Definición—Significado*. <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/pendiente-definicion-significado/gmx-niv15-con195094.htm>
- MOTORGIGA. (2021b). *SEÑALIZACIÓN - Definición—Significado*. <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/senalizacion-definicion-significado/gmx-niv15-con195540.htm>
- MTC. (2016). *Manual de Carreteras—Tuneles, Muros y Obras Complementarias—Peru.pdf*.
- NHI. (2009). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels.pdf*.
- Panting, C. A. (2013). *Honduras tiene las peores carreteras de Centroamérica*. www.laprensa.hn. <https://www.laprensa.hn/honduras/honduras-tiene-las-peores-carreteras-de-centroamerica-BDLP333389>
- PIARC. (2021). *Gálibo vertical | Manual de túneles de carretera—Asociación Mundial de la Carretera*. <https://tunnelsmanual.piarc.org/es/delete-es/galibo-vertical>
- Pineda, P. (2016). *PROCESOS CONSTRUCTIVOS PARA TÚNELES VIALES DESARROLLADOS EN COLOMBIA*. 156.
- Polo, A. (2017). *Tesis.pdf.pdf*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/13692/tesis.pdf.pdf?sequence=1>

Prades. (2020). *Prades MT | Qué es una excavación: Tipos de excavaciones y consejos.*
[//www.pradesmt.com/que-es-una-excavacion-tipos-y-consejos/](http://www.pradesmt.com/que-es-una-excavacion-tipos-y-consejos/)

Ramirez, A. (2019). *AMDC licita nueva solución vial para los capitalinos.*
<https://www.amdc.hn/index.php/sala-de-prensa/noticias-amdc/889-amdc-licita-nueva-solucion-vial-para-los-capitalinos>

Real Academia de Ingeniería. (2021). *Diccionario RAING.*
<http://diccionario.raing.es/es/lema/t%C3%BAnel-carretero>

Ruiz, V. (2019). *DISEÑO ESTRUCTURAL PRELIMINAR DE UN TERCER TÚNEL VEHICULAR EN LO PRADO, RUTA 68.* 142.

Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación.* McGrawHill.

Significados. (2021). *Significado de Tráfico.* Significados. <https://www.significados.com/trafico/>

SOPTRAVI. (1996a). *Manual de Carreteras Tomo I Soptravi.pdf.*

SOPTRAVI. (1996b). *Manual de Carreteras Tomo III Soptravi.pdf.*

SOPTRAVI. (2012). *Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda (SOPTRAVI).*
https://web.archive.org/web/20121009170340/http://www.gob.hn/portal/poder_ejecutivo/secretarias/soptravi/

Soto, P. (2004). *Universidad Austral de Chile—Construcción de Túneles.* 144.

Spiegato. (2021). *¿Qué es la velocidad de diseño? - Spiegato.* <https://spiegato.com/es/que-es-la-velocidad-de-diseno>

Structuralia. (2020). *Construcción de túneles: Mecanismos de sostenimiento del terreno.*
<https://blog.structuralia.com/construccion-de-tuneles-mecanismos-de-sostenimiento-del-terreno>

TLAS. (2018). *Comunidad ¿QUE ES EL DERECHO DE VÍA?*
<https://transversaldelasamericas.com/index.php/sala-de-prensa/noticias/181-comunidad-que-es-el-derecho-de-via>

Tutors, V. (2021). *Secciones transversales.*
https://www.varsitytutors.com/hotmath/hotmath_help/spanish/topics/cross-sections

Vicent, J. (2020). *Qué es Google Meet y cómo usarlo.* TreceBits - Redes Sociales y Tecnología.
<https://www.trecebits.com/2020/04/27/que-es-google-meet-y-como-usarlo/>

Westreicher, G. (2020). *Mantenimiento.* Economipedia.
<https://economipedia.com/definiciones/mantenimiento.html>

ANEXOS

Entrevista al Ing. Julio Gonzáles

WILLIAM Y MOLINA, S.A. DE C.V. (WM CONSTRUCTORES)



- 1) ¿Quién realizó el diseño estructural del túnel de la 27 y 28 calle?
- 2) ¿Quién supervisó la construcción del túnel de la 27 y 28 calle?
- 3) ¿Qué materiales y técnica constructiva se emplearon en el túnel de la 27 y 28 calle?
- 4) ¿Cómo se escogió la sección transversal del túnel de la 27 y 28 calle?
- 5) ¿Qué métodos existen actualmente para la excavación de un túnel carretero?
- 6) ¿Qué información se requiere para diseñar un túnel carretero?
- 7) En cuanto a profesionales ingenieriles, ¿quiénes forman parte en la ejecución de un túnel?
- 8) ¿Se tuvo problemas con el nivel freático? ¿Cómo se realizó el drenaje de las aguas lluvia?
- 9) ¿Qué problemas técnicos y/o estructurales se enfrentaron al realizar el túnel?
- 10) Cuando un pozo o sistema de agua interrumpía con la excavación del túnel, ¿qué solución se daba?
- 11) ¿Cuáles son los ensayos de suelo a aplicar previo a la construcción de un túnel carretero?

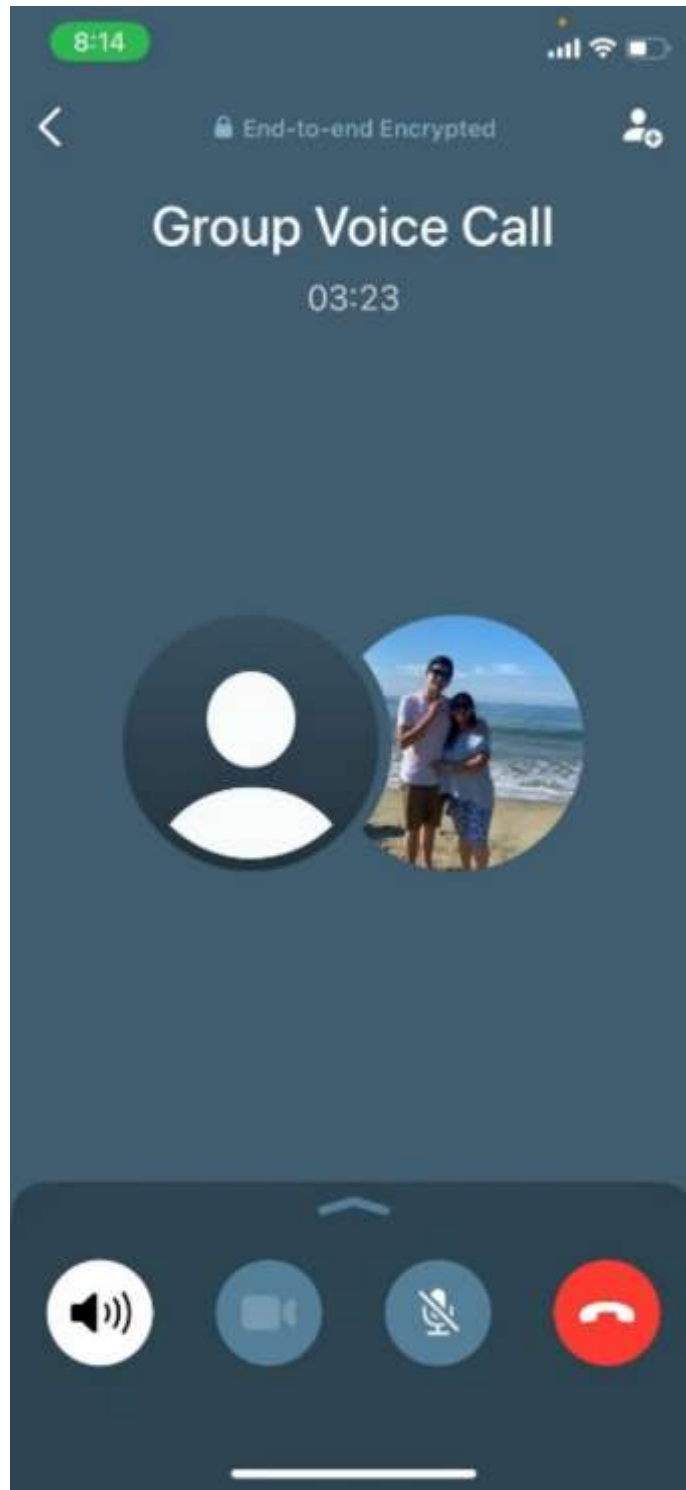


Ilustración 57 – Asesoría #2 con el Ing. Mario Cárdenas vía WhatsApp

Fuente: (Propia, 2021)



Ilustración 58 – Asesoría #3 con el Ing. Mario Cárdenas vía Google Meets

Fuente: (Propia, 2021)

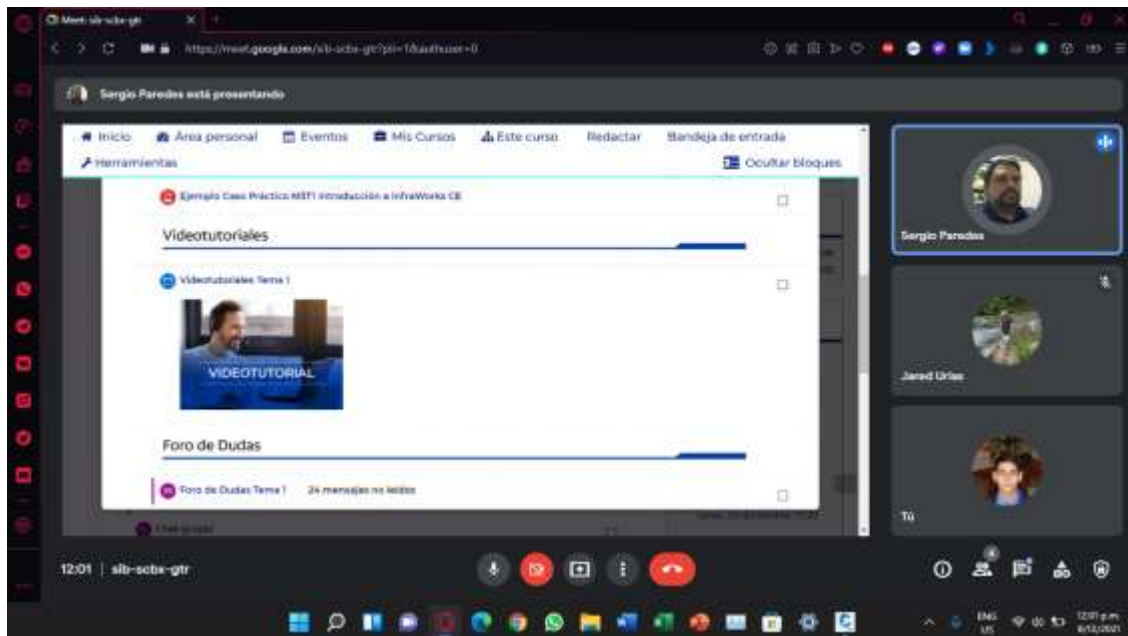


Ilustración 59 – Asesoría #4 con el Ing. Sergio Paredes vía Google Meets

Fuente: (Propia, 2021)



Ilustración 60 – Artículo sobre el inicio de las excavaciones para el túnel de la 27 y 28 calle

Fuente: (Propia, 2021)



Ilustración 61 – Artículo sobre la habilitación del túnel de la 27 calle en San Pedro Sula

Fuente: (Propia, 2021)



Ilustración 62 – Artículo sobre la habilitación del túnel frente a La Reforma

Fuente: (Propia, 2021)



Ilustración 63 – Artículo sobre la habilitación del túnel en el bulevar Suyapa

Fuente: (Propia, 2021)