



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL

**“PROPUESTA PARA LA UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS DE PVC
EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES BAJO LA NORMA
UNE 104424”.**

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE INGNIERO CIVIL.

DIRECTOR DE TESIS:
ING. WILSON CANDO

PRESENTADO POR:

FELIPE ANTONIO BUITRÓN CAÑADAS
QUITO – ECUADOR

2017

AGRADECIMIENTOS

PARA COMENZAR QUIERO AGRADECER A DIOS POR GUIARME Y DARME LA CONFIANZA DE LOGRAR TODO LO QUE ME PROPONGO Y DESPUÉS A MIS PADRES Y FAMILIARES QUE ME HAN APOYADO A LO LARGO DE ESTE CAMINO UNIVERSITARIO.

QUIERO AGRADECER A LAS PERSONAS QUE DE UNA U OTRA FORMA COLABORARON EN LA OBTENCIÓN DE DATOS PARA PODER REALIZAR UN MEJOR TRABAJO Y AL ING. WILSON CANDO, DIRECTOR DE LA TESIS, POR SU AYUDA.

DEDICATORIA

ESTE TRABAJO VA
DEDICADO A TODA MI
FAMILIA, AMIGOS Y A
QUIENES ME HAN
ACOMPAÑADO DURANTE
ESTE TRAYECTO.

CONTENIDO

Términos y definiciones

CAPITULO I

1	Generalidades.	1
1.1	Túneles	1
1.1.1	Definición de Túnel	1
1.1.2	Evolución de los Túneles	1
1.1.3	La Necesidad de un túnel	3
1.2	Principios Básicos de Diseño	4
1.2.1	Capacidad portante del suelo o roca	5
1.2.2	Sostenimiento	5
1.2.3	Control de la excavación	5
1.3	Métodos de Construcción	6
1.4	Métodos de Avance	7
1.4.1	Tipos de excavaciones	10
1.5	Condiciones del terreno en el Sistema Constructivo	13
1.6	Túneles y agua	14

CAPITULO 2

2	Sistemas de Impermeabilización de Túneles	15
2.2	Importancia de la Impermeabilización de un Túnel.	15
2.3	Factores que se toman en cuenta para la Impermeabilización de Túneles.	17
2.3.1	Hidrogeológicos.	17
2.3.2	Condiciones del Terreno.	20
2.3.3	Uso del Túnel.	20
2.3.4	Condiciones del agua	21
2.5	Sistema de impermeabilización	25

2.5.1 Impermeabilización Primaria.	25
2.5.2 Impermeabilización Intermedia.	26
2.5.3 Impermeabilización Principal.	27
2.6 Control de Calidad	27
2.7 Acerca de Normativa usada	28

CAPITULO 3

3 Materiales para la Impermeabilización Principal	29
3.1 Geotextil	29
3.1.1 Definición de Geotextil	29
3.1.2 Función del Geotextil en el sistema de impermeabilización	30
3.1.3 Elección del Geotextil	30
3.1.4 Recepción del Geotextil	31
3.1.5 Colocación del Geotextil	31
3.2 Lamina de impermeabilización de PVC	32
3.2.1 Definición de PVC	32
3.2.2 Generalidades de la geomembrana PVC para la impermeabilización.	32
3.2.3 Ventajas del uso de geomembranas de PVC	33
3.2.4 Elección de la Lámina impermeabilizante	33
3.2.5 Recepción de la lámina impermeabilizante	34
3.2.6 Colocación de la lámina impermeabilizante	34
3.2.7 Soldadura de Membrana de PVC	35
3.3 Disponibilidad en el Mercado	38

CAPITULO 4

4 Aplicación del sistema de impermeabilización en el Ecuador.	39
4.1 Infraestructura de Túneles en el Ecuador.	39
4.2 Túnel vía Tolontag – Pintag.	43
4.2.1 Generalidades.	43
4.3 Estudio de Suelos.	45

4.3.1 Clasificación SUCS.	46
4.3.2 Relaciones Fundamentales.	56
4.3.3 Permeabilidad del Suelo.	68
4.3.4 Caudal de Infiltración	68
4.4 Elección del Material para la Impermeabilización Principal	69
4.4.1 Elección del geotextil.	70
4.5.1 Elección de la lámina de PVC.	71
4.6 Mediciones y Cantidad de Material	72
CAPITULO 5	
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	82

INDICE DE ESQUEMAS

ESQUEMA 1.1 - Criterios para determinar el método constructivo	6
--	---

INDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1.1 – Avance por perforación y voladura	8
IMAGEN 1.2 - Discos de corte	8
IMAGEN 1.3 - Tuneladora usada para el Metro de Quito.	9
IMAGEN 1.4 - Martillo Hidráulico	9
IMAGEN 1.5 - Rozadora en el frente de excavación	10
IMAGEN 1.6 - Método Inglés	10
IMAGEN 1.7 - Método Belga	11
IMAGEN 1.8 - Método Alemán	12
IMAGEN 1.9 - Método Austriaco	12
IMAGEN 2.1 – Sistema drenado	16
IMAGEN 2.2 – Sistema no drenado	16
IMAGEN 2.3 - Estructura de un acuífero	22
IMAGEN 2.4 - Ubicación del sistema de impermeabilización en túneles	25
IMAGEN 2.5 - Requisitos del soporte según la Norma Española 104424	27
IMAGEN 3.1 - Clasificación de los Geotextiles	32
IMAGEN 3.2 - Anclaje del geotextil y soldadura de la membrana	34
IMAGEN 3.3 – Esquema tipo de andamiaje para colocación automática	38
IMAGEN 3.4 – Máquina para soldar geomembranas	39
IMAGEN 3.5 – Solape con canal central	40
IMAGEN 3.6 – Solape especial con canal central	40
IMAGEN 3.7 – Control de soldadura	40
IMAGEN 4.1 – Túnel de San Juan	42
IMAGEN 4.2 – Túnel de Guayasamín	43
IMAGEN 4.3 – Túnel San Eduardo	43

IMAGEN 4.4 – Túnel Cerro El Carmen	44
IMAGEN 4.5 – Perforación del túnel de conducción COCA COCO SINCLAIR	44
IMAGEN 4.6 – Excavación del Túnel de conducción Agoyán-San Francisco	45
IMAGEN 4.7 – Túnel trasvase San Marcos	45
IMAGEN 4.8 – Túnel Chisinche	46
IMAGEN 4.9 – Metro de Quito	46
IMAGEN 4.10 – Ubicación de Pintag	48
IMAGEN 4.11 – Trazado del Túnel	48
IMAGEN 4.12 – Túnel vía Tolontag – Píntag	50
IMAGEN 4.13 – Muestras para limite plástico	53
IMAGEN 4.14 – Muestras para limite líquido	55
IMAGEN 4.15 – Extracción de aire atrapado	64
IMAGEN 4.16 – Temperatura de Prueba	64
IMAGEN 4.17 – Extracción de la muestra de 5x5cm	69
IMAGEN 4.18 – Geo dren Planar	78
IMAGEN 4.19 Membrana FLAGON BT/ST 2.0mm.	79
IMAGEN 4.20 Interior túnel de la vía Tolontag – Píntag	80
IMAGEN 4.21 – Sistema de fijación de la geomembrana PVC	82
IMAGEN 4.22 – Sistema de fijación del Geotextil, vista en planta	83
IMAGEN 4.23 – Detalle de la excavación manual para la colocación de tubería	83
IMAGEN 4.24 – Sección Transversal del túnel	86
IMAGEN 4.25 – Estructura del sistema de impermeabilización	88

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 - Definición de impermeabilización para el diseño de Túneles y galerías	21
TABLA 2 - Clasificación de los agresivos y sus efectos	23
TABLA 3 - Factores que determinan la agresividad	24
TABLA 4 - Definición de las propiedades mecánicas e hidráulicas mínimas del geotextil, según el tipo de túnel.	33
TABLA 5 – Requisitos para láminas de PVC-P de 2mm de espesor para la impermeabilización de túneles	36
TABLA 6 – Precipitación media mensual	47
TABLA 7 – Sistema unificado de clasificación de suelos SUCS	59
TABLA 8 – Densidad del agua y coeficiente de temperatura para varias temperaturas	65
TABLA 9 – Valores relativos de permeabilidad.	74
TABLA 10 – Valores de velocidad de infiltración dependiendo del tipo de suelo	75
TABLA 11 – Valores obtenidos en los ensayos de laboratorio	78

RESUMEN

Los túneles son obras subterráneas que atraviesan macizos rocosos cuyos componentes son estructuras complejas debido a la geología, la hidrogeología y la geomorfología del lugar donde se va a emplazar la construcción. Por lo tanto, es necesario tener un conocimiento pleno de las características de dicho macizo.

Uno de los componentes principales que hay que tomar en cuenta es el estudio Hidrogeológico de la zona. E.Custodio y M.R. Llamas, en su libro *Hidrogeología Subterránea* nos define la Hidrogeología como “La rama de la Hidrología que trata del agua subterránea, su yacimiento y movimientos, su enriquecimiento y empobrecimiento; de las propiedades de las rocas que controlan sus movimientos y almacenamiento, así como de los métodos de su investigación, utilización y conservación”.

Como bien se lo menciona en la cita anterior, existen aguas subterráneas dentro del macizo rocoso, que tienen su propio ciclo de vida y se encuentra en equilibrio con su entorno. La construcción de un túnel va a modificar cualquier situación que existiera en un principio y modificara evidentemente el movimiento del agua dentro del macizo.

Ahora bien, al existir la presencia de agua subterránea, se puede generar filtraciones hacia el interior del túnel. Las causas son varias, como por ejemplo presencia de grietas, capilaridad o juntas de construcción debido al mal proceso constructivo.

Debido a estas circunstancias es esencial implementar un sistema de impermeabilización dentro del túnel, el cual desempeñara la función de evitar el contacto del revestimiento definitivo con aguas agresivas(sulfatos), procesos de lixiviación de finos, carbonatación y cristalización de sales disueltas.

La membrana termoplástica prefabricada de PVC es aquella que se va analizar a profundidad en este trabajo, para poder establecer una propuesta que sea válida para el mercado ecuatoriano.

SUMMARY

Tunnels are underground constructions that go through rocky massifs which components are complex structures due to the geology, hydrogeology and geomorphology of the place where the construction will be done.

One of the principal components that we have to take in consideration is the hydrogeology studies of the zone

E.Custodio y M.R. Llamas, on their book “ Underground Hydrogeology” define the Hydrogeology like “ the branch of the hydrology that deals with groundwater, its reservoir and movements, its enrichment and impoverishment; about the properties of rocks that control their movements and storage, as well as the methods of their research, use and conservation”.

As well mentioned in the above quote, there are underground waters within the rocky massif, which have their own life cycle and are in balance with their surroundings. The construction of a tunnel will modify any situation that existed at first and will obviously change the movement of water within the massif.

However, with the presence of groundwater, leaks can be generated towards the interior of the tunnel. The causes are several, such as presence of cracks, capillarity or construction joints due to poor constructive process.

Due to these circumstances, it is essential to implement a waterproofing system inside the tunnel, which has the function of avoiding the contact of the final coating with the aggressive ones (sulphates), fine leaching processes, carbonation and crystallization of dissolved salts.

The prefabricated thermoplastic PVC membrane is one that will be analyzed in depth in this work, in order to establish a proposal that is valid for the Ecuadorian market.

INTRODUCCION

El territorio de la República del Ecuador está ubicado en la costa nor-occidental de América del Sur, donde es atravesado por La Cordillera de los Andes de norte a sur, y forma un gran obstáculo montañoso con formas escarpadas y geografía que dificulta la construcción de vías para la comunicación de todo el país. Un gran porcentaje del territorio ecuatoriano es conformado por montañas, lomas, cerros, formaciones geológicas que se han formado a lo largo del tiempo y poseen un potencial minero formidable que próximamente será explotado.

La Cordillera de los Andes ha sido participe de dividir al país en tres regiones (costa, sierra, oriente), aparte de la región insular que es Galápagos. Por lo cual es muy importante crear una red vial estatal que comunique todos los puntos del Ecuador sin mayor inconveniencia y en tiempos de viaje óptimos. Esto, y las futuras actividades mineras demandaran una cantidad importante de túneles y obras subterráneas a lo largo de todo el País.

En la actualidad Lemke et al. (2008) señalan que los túneles se construyen para un periodo de diseño de hasta por lo menos 100 años. Para esto, es necesario mantener un proceso muy riguroso desde el principio, la culminación y el mantenimiento de los distintos sistemas que participan en la construcción de esta compleja obra de ingeniería que son los túneles, en especial con los procesos de revestimiento e impermeabilización de dicha estructura, ya que el agua tiene una influencia muy grande en este tipo de construcciones tanto en la durabilidad, el mantenimiento como en los procesos de reparación posteriores.

Construcciones civiles como vías, puentes y túneles son susceptibles a la filtración de aguas agresivas, las cuales causan daños en la estructura, atacando a sus propiedades y generando imperfecciones como grietas o poros en el hormigón. La filtración del agua puede ser crítica en ciertas estructuras como los túneles, que desplazan tráfico vehicular o peatonal bajo cuerpos inmensos de agua subterránea. Es ahí donde se ve, que la impermeabilización en los túneles es una actividad de suma importancia y a la vez benéfica para la economía y mantenimiento del mismo. Por lo tanto, este trabajo consiste en proponer al mercado del sector de la construcción, que, aplicando un sistema de impermeabilización, en este caso, mediante la utilización de membranas de PVC tal y como se describe en la norma UNE (Una Norma Española) 104424 que trata acerca de “sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC”, se pueda mejorar la calidad y la durabilidad de los futuros túneles realizados en el país.

Este documento pretende analizar si es verdaderamente factible la utilización de este sistema de impermeabilización de túneles dentro del Ecuador, y como ejemplo de implementar este sistema en el país se va a analizar el túnel de la vía Pintag – Tolontag en el cual se ha realizado los estudios necesarios para poder estimar el caudal de infiltración y así poder determinar el grado de impermeabilización del túnel.

En adición y para poder tener un conocimiento de lo que se va a tratar en este trabajo, se presentara los detalles relacionados con el concepto de impermeabilización de túneles, para así tener un entendimiento de lo que se habla.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Establecer una propuesta para la utilización de membranas de PVC en la impermeabilización de túneles bajo la norma UNE 104424.

Objetivos específicos

- Analizar si es factible la utilización de PVC como recubrimiento para la impermeabilización de túneles en el Ecuador, averiguando la disponibilidad de los materiales en el mercado.
- Establecer el tipo de impermeabilización en un túnel, mediante el conocimiento hidrogeológico, las condiciones del terreno, el uso del túnel y las condiciones del agua de la zona.
- Presentar los detalles relacionados con el concepto de impermeabilización, no solo desde el punto de vista de los materiales, sino considerando a su vez los procedimientos de instalación, con el fin de alcanzar el 100% de estanqueidad en el túnel.

CAPITULO 1: GENERALIDADES

TÚNELES

DEFINICIÓN DE TÚNEL

Un túnel es una obra subterránea de carácter lineal que tiene como finalidad comunicar dos puntos, mediante un trazado apropiado y funcional brindándole continuidad a un proyecto manteniendo los diseños geométricos, cruzando obstáculos topográficos como son las montañas, macizos rocosos, etc.

Generalmente los túneles son construidos para proyectos ligados a: carreteras, vías férreas, minería, obras hidráulicas entre otras.

Los túneles son obras de ingeniería complejas las cuales requieren de técnicas, productos, equipos especiales, y análisis: geológicos, geotécnicos e hidráulicos desarrollados por especialistas de sus respectivas ramas.

EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES

Probablemente los primeros túneles en el Mundo fueron realizados por cavernícolas, tal vez con el fin de agrandar sus hogares las cuales eran cuevas excavadas en la montaña, o también en busca de agua o cualquier otro fin que hayan encontrado beneficioso para ellos. A lo largo de la historia, las técnicas y métodos de construcción de túneles han ido avanzando y mejorando comenzando desde las principales civilizaciones antiguas.

En Babilonia, uno de los imperios más antiguos de la humanidad, se elaboraban túneles generalmente para crear sistemas de riego, pero lo que más se nombra, es que fueron los autores de uno de los túneles más antiguos de la historia que consiste en un pasaje peatonal, el cual consta con un recubierto principal elaborado de ladrillos, su longitud es de más o menos 900 metros, que fueron construidos en la época del 2180 a 2160 AC bajo el río Éufrates para conectar el palacio real con el templo de Belos. La construcción fue una excavación de una zanja a cielo abierto y posteriormente cubierto, para realizarlo, se tuvo que desviar el río durante la temporada de sequía.

Así mismo, los egipcios desarrollaron técnicas apropiadas para cortar rocas suaves con sierras de cobre y taladros huecos. Estas técnicas probablemente fueron usadas en un principio para obtener bloques de piedra y luego más tarde para realizar excavaciones que tenían como fin construir los templos de los faraones. Un ejemplo muy claro es el templo Abu Simbel ubicado en el Nilo, el cual fue construido sobre piedra caliza en 1250 AC para Ramsés II. Después de este, otros templos mejor elaborados fueron excavados dentro de roca sólida en Etiopía y la India.

Los griegos y los romanos realizaron un mayor uso de los túneles, ya sea para poder hacer uso de áreas pantanosas, drenando el agua excedente en ellas y para la elaboración de acueductos. Un ejemplo es el túnel de agua en Grecia que fue construido en el siglo VI AC en la isla de Samos, el cual conduce agua más o menos 1036 metros de longitud a través de piedra caliza.

Tal vez, el túnel más largo de la antigüedad es “El Pausalippo” que se encuentra entre Nápoles y Pozzuoli. Tiene una longitud de 1463 metros y se construyó en 36 AC. Para ese tiempo ya existían métodos topográficos y los túneles eran más avanzados. Se intentó proporcionar ventilación al interior de los túneles mediante ejes estrechamente espaciados. Pero su ventilación era primitiva y la mayoría de los túneles construidos cobraron la vida de miles de esclavos que fueron usados para trabajar en condiciones inhumanas.

Después de las primeras civilizaciones y sus avances significativos, llega la edad media, en donde los túneles eran limitados para ingeniería militar y la minería, por lo que el siguiente gran avance fue afrontar el inevitable crecimiento de la población y por ende, del transporte de Europa en el siglo XVII. Se construyeron varios túneles importantes, el primero fue construido en 1666 en Francia, su nombre era “Canal du Midi”, con 157 metros de longitud y fue parte del primer canal que une el Atlántico con el Mediterráneo. Otro canal importante fue el “Bridgewater Canal”, construido en Inglaterra en 1761 con el propósito de llevar carbón a Manchester desde la mina de Worsley. Varios túneles fueron realizados en toda Europa y Norte América en el siglo XVIII y comienzos del siglo XIX.

En el año 1830 aparecieron los ferrocarriles que pusieron en desuso a los canales, y trajeron consigo un incremento significativo en la realización de túneles. Con el objetivo de acortar las distancias y mantener comunicación entre poblaciones se han presentado retos de atravesar montañas cada vez a mayor profundidad y alcanzando distancias que en un principio nunca se pudiera haber imaginado.

A lo largo de toda la historia, se han presentado situaciones las cuales se han visto en la necesidad de ser solventadas, ya sea el incorporar ventilación al túnel para poder trabajar en condiciones favorables o el lidiar con el ingreso de agua subterránea al interior de un túnel. Con el tiempo y con el desarrollo de la sociedad se han creado nuevas tecnologías basadas en la experiencia y que, gracias a ellas, se podrá realizar túneles seguros y confiables para el uso de la humanidad.

LA NECESIDAD DE UN TÚNEL

En general, un túnel es una solución alternativa a otros métodos constructivos a cielo abierto que se pueda realizar dependiendo de la necesidad. Ecuador es un país que posee una orografía muy accidentada, debido a las grandes cadenas montañosas que cruzan nuestro territorio, esta es la principal razón que ha dado cabida a la construcción de túneles en los sistemas viales para poder conectar de la manera más beneficiosa posible ciudades o sectores importantes y así facilitar el transporte y los tiempos de viaje.

También, debido al notable crecimiento de las principales ciudades del país ha aumentado el parque automotor y la comunicación entre ellas, por lo tanto, se acortan las brechas y existe mayor movilización y mayor demanda de sistemas viales adecuados que abastezcan y brinden un servicio óptimo a la sociedad, por esta razón ha sido necesario estudiar nuevas alternativas de tránsito a las ya existentes, para poder mejorar los niveles de servicio de nuestras redes viales.

Según el Ingeniero Enrique Mou en su texto “Importancia de los Túneles” las razones que habitualmente genera la idea de construir un túnel son:

- La topografía del terreno, ya que puede limitar la construcción de una vía debido a las pendientes límites que están normadas en las especificaciones técnicas.
- La economía, es decir, en ocasiones es más rentable atravesar un obstáculo mediante un túnel que rodearlo.
- La ordenación urbanística y de tráfico: en grandes ciudades la construcción de metros facilita y mejora la movilidad.
- La estética y salud: se construye túneles o galerías para la conducción de aguas negras y para el saneamiento en la ciudad.
- La minería.
- Conducciones de sistemas: en un sistema de riego o para una central hidroeléctrica.

PRINCIPIOS BÁSICOS DE DISEÑO

Sin considerar el uso que se le va a dar al túnel, aun sabiendo que este hecho condiciona la disposición de un recubrimiento definitivo o no, se tiene que considerar tres aspectos esenciales al momento de diseñar una obra subterránea.

La predicción de los problemas que se puedan presentar a lo largo de todo el trazado debido a las condiciones del terreno y la presencia de agua subterránea que pueda existir es una de ellas. Otro aspecto que es muy importante es el impacto ambiental que se va a generar en el ecosistema, ya que hoy en día, éste, es uno de los factores más importantes a considerar al momento de realizar cualquier tipo de construcción. También es importante mencionar, que se debe considerar las estructuras cercanas al trazado en el caso que las hubiera.

Para poder realizar el diseño de un túnel, hay la necesidad de conocer el comportamiento del modelo geotécnico de la zona donde se va a realizar la excavación, con énfasis en terrenos donde se encuentren zonas frágiles, fallas y donde se determine que existe nivel freático cercano, ya que son zonas que existe una gran presión de agua y podrían existir problemas al momento de avanzar en la excavación. Como ya lo mencioné anteriormente es de gran vitalidad tomar en cuenta los efectos que se pueda generar al medio ambiente, a infraestructuras cercanas o, a los acuíferos de la zona.

Otros aspectos que se toman en cuenta son:

- Cargas que va a soportar el túnel.
- Diseño del sostenimiento provisional o definitivo.
- Predicción de los movimientos inducidos por la excavación.

Debido a que los túneles son obras subterráneas, se entra en un tema de que el terreno se encuentra en su propio estado de equilibrio y estado tensional, al momento de realizar las excavaciones se rompe el estado de equilibrio y se altera el estado tensional debido a la existencia de fallas o presencia de material fracturado.

Por esta razón, se tiene que plantear un diseño de sostenimiento y realizar el cálculo necesario para conocer la carga que ejerce el terreno, los cuales se pueden realizar mediante cálculos empíricos o métodos matemáticos que se basan en comportamientos elásticos mediante la aplicación de elementos finitos, los cuales han sido muy usados en sistemas de cálculo computacional y que ha generado la creación de varias aplicaciones para el diseño de túneles.

Ya conociendo todos los aspectos mencionados, se debe escoger el mejor sistema de excavación, aquel que se adapte a las necesidades y permita realizar un sostenimiento adecuado. En el caso que lo requiera, se debe estabilizar y reforzar el suelo antes de la extracción, mediante métodos como inyecciones de hormigón, hormigón lanzado, u otros métodos que ayuden al soporte y sostenimiento del avance del túnel.

Una obra subterránea que tenga filtraciones hacia su interior, se puede llamar un drenaje de las aguas subterráneas, la cual va a generar consecuencias al régimen freático del terreno supra yacente (Palma, 2005, pág. 29). Y causara varios problemas, como el descenso del nivel freático de la zona y consecuentemente afectar a la agricultura, o incluso generar asientos en los terrenos. En el caso de que existan edificaciones, vías o alguna estructura en los sectores aledaños, pueden resultar afectados a largo plazo debido a los asientos diferenciales del terreno.

Por todo esto, es necesario tener un conocimiento pleno acerca del tema y es esencial realizar los respectivos estudios que permitan obtener toda la información necesaria para tomar las decisiones adecuadas durante el diseño y la construcción del túnel, siempre teniendo en cuenta estas tres áreas que condicionan la construcción de la obra subterránea.

- **CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO O ROCA**

El sostenimiento principal de un túnel es su propio suelo o roca, dependiendo del terreno que se tenga. Por lo tanto, es de gran importancia tratar de garantizar este hecho, y esto se logra gracias a la elección de un adecuado sistema de excavación que no afecte a las características geomecánicas de la roca o suelo que se encuentra alrededor del trazado y que a través de un sostenimiento evitar que se altere y debilite el terreno

Cabe señalar que es conveniente tratar de no generar concentraciones de tensiones, debido a que la roca no resiste y se fractura. Esto se logra escogiendo una adecuada sección y tipo de excavación tomando en cuenta que las formas circulares son las más recomendadas (Palma, 2005, pág. 30).

- **SOSTENIMIENTO**

Es primordial ubicar un sostenimiento flexible conforme se avance en la excavación, ya que de esta manera se puede disipar la carga a través de deformaciones aceptables que se generan durante el proceso de excavación y así evitar deformaciones demasiado grandes que pueden debilitar el sostenimiento.

En el caso de encontrarse con terrenos problemáticos, es recomendable conseguir un cierre del anillo resistente lo más pronto posible para que sostenga y estabilice la roca o suelo afectado por la excavación.

- **CONTROL DE LA EXCAVACIÓN**

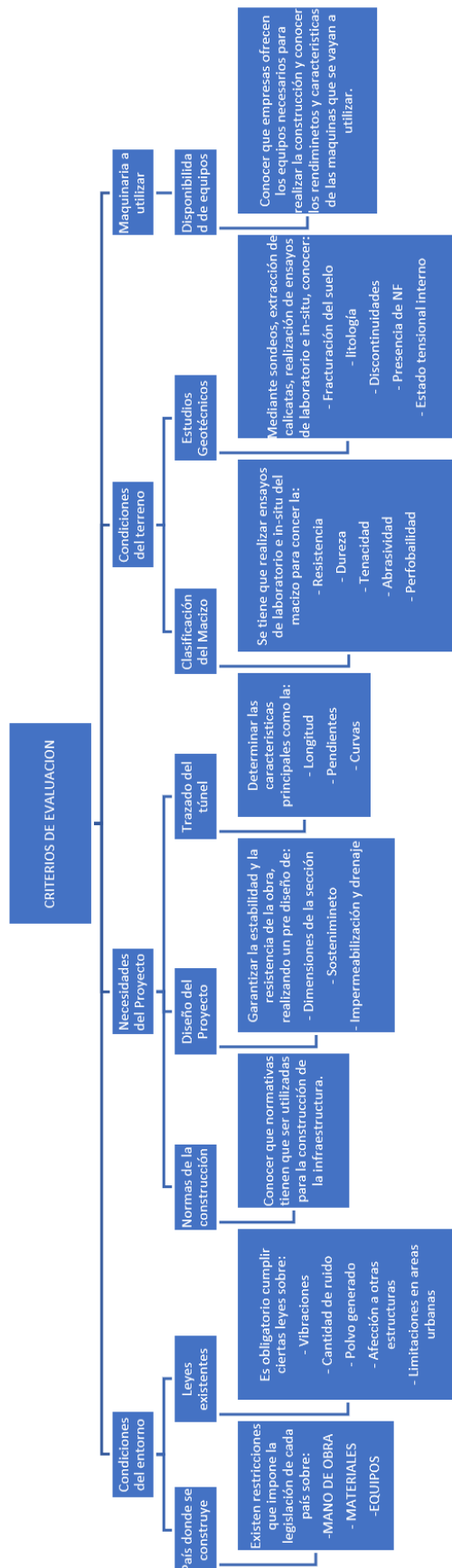
Conocer las deformaciones que se producen al interior del túnel y las tensiones en las que se encuentra el suelo o la roca encima del sostenimiento, es esencial para tomar decisiones en el avance de la excavación, y requiere que se dé una medición continua mediante auscultación, ya que nos podría guiar en el tipo de sostenimiento que se le dé al túnel, ya que éste depende de las condiciones del terreno que no son necesariamente las mismas a lo largo del trazado.

METODOS CONSTRUCTIVOS

Cuando se desea realizar una obra subterránea, hay varios criterios que se toman en cuenta para determinar que método constructivo es el mejor para ejecutar la construcción del túnel, los cuales son:

- Condiciones del entorno
- Necesidades del proyecto
- Características del terreno
- Disponibilidad de equipos

En el diagrama que se presenta a continuación se describen los criterios ya antes mencionados.



ESQUEMA 1.1 – Criterios para determinar el método constructivo

Considerando todos los criterios mencionados, cabe señalar que el principal factor para seleccionar el mejor método de construcción va a depender esencialmente de las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno donde se realizara el túnel, ya que ésta es única de cada caso en particular (Vargas, 2011). Dicho esto, se debe conocer la clasificación de los macizos rocosos o suelo a excavar, y las características de los materiales que se presentan.

MÉTODOS DE AVANCE

Según el Profesor Silvio Rojas de la Universidad de los Andes en Venezuela, los métodos de avance de túneles se dividen dependiendo si la excavación es en suelo o en roca.

Para túneles en suelos, se utilizan sistemas tales como:

- Escudos
- Pre - corte mecánico
- Prebóveda de jet grouting
- Congelación del suelo
- Hormigón proyectado

Para túneles en roca:

- Perforación y voladura
- Excavación mecánica

A continuación, voy a describir los métodos más utilizados.

Perforación y voladura

Este sistema es el que más se utiliza para la elaboración de túneles, es muy recomendado cuando el terreno tiene roca abrasiva y muy resistente. El método consiste en perforar el frente de la excavación en varios puntos y colocar cargas dependiendo de la zona de la sección, al detonar y generar la explosión, se genera una energía en forma de presión de gases y energía de vibración, que quebranta la roca. Finalmente se realiza la limpieza y saneo de los escombros generados.

Las perforaciones se realizan mediante la utilización de martillos manuales y martillos hidráulicos y la voladura debe ser suave, controlada para minimizar el daño estructural al macizo.



IMAGEN 1.1 - Avance por perforación y voladura

Fuente: http://www.geoasbuilt.es/tutoriales/mecanica/Clase2_MetodosExacavacion_1.pdf. Mérida, mayo 2009.

Elaborado por: Prof. Silvio Rojas

Excavación Mecánica

Existen equipos que poseen en su sistema discos de corte, los cuales son impulsados por un sistema hidráulico que funciona mediante la energía que se le proporciona al motor eléctrico de la máquina que se encuentran en contacto con la roca. Estos al poseer mayor resistencia a la penetración, a la tracción y al corte que la roca a excavar, continua su avance sin mayor problema.



IMAGEN 1.2 - Discos de corte

Fuente: http://www.adifaltavelocidad.es/eu_ES/img/fichas/Discosdecorte_lote1.JPG

Elaborado por: Adif

Generalmente los sistemas de excavación mecánica más utilizados son:

Tuneladoras

También conocidos como topos o TBM, éstos realizan una excavación a plena sección mediante el avance de la cabeza giratoria que posee los discos de corte impulsados por un sistema hidráulico de la máquina. Estos discos penetran la roca por tracción y cizallamiento produciendo lascas por los cortadores.



IMAGEN 1.3 - Tuneladora usada para el Metro de Quito.

Fuente: <http://www.railwaypro.com/wp/wp-content/uploads/2016/10/acciona-quito-metro.jpg>. Quito, octubre 2016.

Elaborado por: Acciona

Martillo Hidráulico

Este sistema de excavación consiste en una máquina que posee un brazo articulado donde se encuentra una herramienta que permite un ataque puntual, gracias a un martillo que se mueve debido a un circuito hidráulico que funciona mediante motores eléctricos o a Diesel. Éste martillo quebranta la roca por el impacto generado, creando pequeños bloques que se desprenden al seguir avanzando.

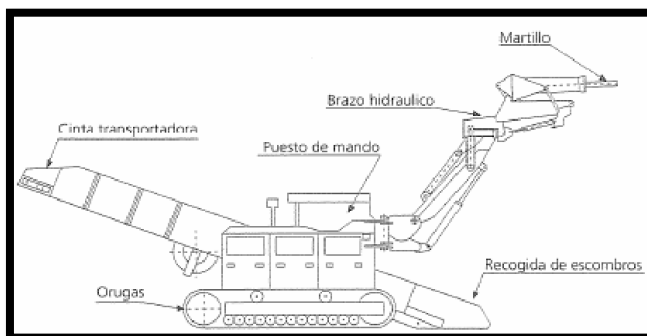


IMAGEN 1.4 - Martillo Hidráulico

Fuente: http://www.geoasbuilt.es/tutoriales/mecanica/Clase2_MetodosExacavacion_1.pdf. Mérida, mayo 2009.

Elaborado por: Prof. Silvio Rojas

Rozadora

Este sistema de avance se da mediante la utilización de una máquina de ataque puntual, la cual consiste en la rotación de un brazo que se desplaza y barre la sección que se está excavando. Al final del brazo existe una cabeza provista de herramientas de corte que avanza la excavación sacando el material. Este sistema se puede utilizar en terrenos de resistencia blanda o media y en obras donde las longitudes de excavación sean cortas.



IMAGEN 1.5 - Rozadora en el frente de excavación

Fuente: <https://www.structuralia.com/images/actualidad/2016-01/rozadoras2.jpg>. Madrid, enero 2016.

Elaborado por: Structuralia

- **TIPOS DE EXCAVACIONES.**

A lo largo de la historia se han desarrollado diversos tipos de excavaciones que han ido variando según las condiciones de terreno que se han encontrado ya que si es roca la perforación se podrá realizar a sección completa, pero si nos encontramos con terrenos sueltos, el avance será mediante pequeñas secciones que fundamentalmente se diferencian en la secuencia de excavación. A continuación, se presentarán algunos de los métodos más importantes.

Método Inglés

Llamado así por ser un método aplicado en tipos de terreno como arenas y areniscas existentes en Inglaterra. Éste, consiste en avanzar la perforación en toda la sección con una sola operación.

Debido a la geología del Ecuador, este método no se utiliza ya que otros métodos son mayores eficaces al momento de efectuar las excavaciones.

La figura que se muestra a continuación muestra el orden de ejecución de cada etapa de excavación.

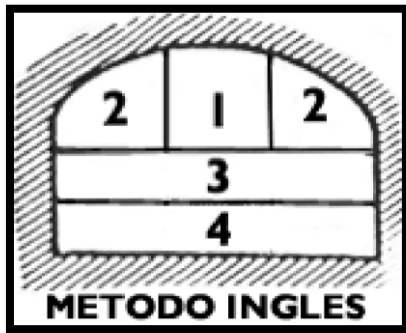


IMAGEN 1.6 - Método Inglés

Fuente: <http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/tuneles/Paginas/M%C3%A9todo%20de%20Excavaci%C3%B3n.aspx>.

Elaborado por: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

Método Belga

Este método se lo llama así ya que sigue los principios de la construcción del túnel de Charleroi, que conecta Bruselas y Charleroi.

Gracias a las pequeñas secciones de excavación que se realizan en este método, se reduce la probabilidad de que se genere asentamientos o deslizamientos del terreno, lo cual lo hace un método seguro.

El método se lo utiliza para todo tipo de terreno, principalmente en terrenos blandos, pero su principal desventaja es que tiene un rendimiento general de la obra bajo a diferencia de otros métodos.

En el Ecuador es el más utilizado y un ejemplo es la construcción del túnel que encauza las aguas del Río Machangara por debajo del intercambiador del “El Trébol”.

A continuación, se muestra las etapas de excavación:



IMAGEN 1.7 - Método Belga

Fuente: <http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/tuneles/Paginas/M%C3%A9todo%20de%20Excavaci%C3%B3n.aspx>.

Elaborado por: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

Método Alemán y Método Alemán Modificado

Fue desarrollado por Wiebeking en el año de 1814, para la construcción de un túnel en el Canal de San Quintín. Este método sigue un sistema de núcleo central como se ve en la figura.

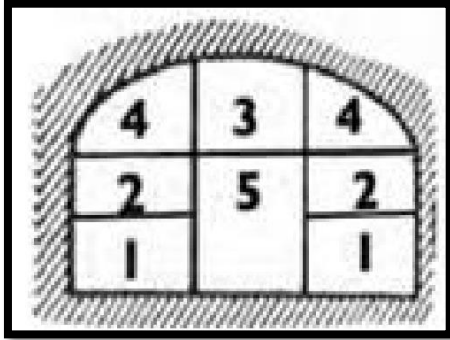


IMAGEN 1.8 - Método Alemán

Fuente: <http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/tuneles/Paginas/M%C3%A9todo%20de%20Excavaci%C3%B3n.aspx>

Elaborado por: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

El método Alemán Modificado es básicamente lo mismo que el anterior, pero debido a la presencia de agua se modifican las etapas sucesivas de ataque del frente.

Método Austriaco

Este método, consiste en el uso de puntales para generar un sistema de entibación a medida que se realiza el avance. El orden de excavación se presenta en la siguiente figura.



IMAGEN 1.9 - Método Austriaco

Fuente: <http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/tuneles/Paginas/M%C3%A9todo%20de%20Excavaci%C3%B3n.aspx>

Elaborado por: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

Debido a la existencia de desplazamientos y hundimientos en este método, se le considera peligroso e incluso se ha prohibido su procedimiento en países como España. No se recomienda su uso en terrenos blandos, por lo tanto, no es viable en el Ecuador, ya que la mayoría de los subsuelos son de este tipo.

En este método, el avance puede ser a sección completa, alcanzando secciones sumamente grandes que tienen la probabilidad de desplomarse. Por esta razón se reduce la sección de excavación cambiando así el procedimiento ya establecido y nace el Nuevo Método Austríaco, que proyecta mejores resultados que el normal y brinda mayor libertad en el proceso de trabajo.

CONDICIONES DEL TERRENO EN EL SISTEMA CONSTRUCTIVO

Durante el proceso de estudios e investigaciones del terreno, nos vamos a encontrar con distintos tipos de terreno que se presentan a lo largo del trazado de diseño, éstos influyen en la elección del sistema constructivo, el revestimiento que se le dará y la elección de un sistema de impermeabilización.

Se pueden reconocer tres tipos de terreno:

- 1. Terreno duro:** Conociendo las características del terreno y suponiendo que el túnel es estable, se puede realizar la excavación mediante la extracción de grandes bloques de terreno sin verse en la necesidad de un sostenimiento previo, aunque éste le podría brindar mayor seguridad.
- 2. Terreno quebradizo:** En este tipo de terrenos es imposible avanzar la excavación a sección completa, es por esto por lo que se realiza el avance mediante la utilización de los métodos ya antes mencionados (método inglés, belga, austriaco), siendo primordial la colocación de un sostenimiento previo en cada etapa para brindar seguridad a los trabajadores y al avance de la obra.
- 3. Terreno blando:** Estos tipos de terreno son suelos plásticos, donde el avance o método de excavación debe ser mediante una maquina tuneladora. Su revestimiento debe ser colocado tan pronto se crea la sección del túnel.

TUNELES Y AGUA

Durante el proceso constructivo y durante el funcionamiento de los túneles, existe un factor muy importante que hay que tomar en cuenta, el cual es el agua subterránea presente en el subsuelo donde se van a realizar la construcción. La presencia de agua puede generar retrasos en la construcción e incluso causar la paralización de esta. De igual manera, si no se realiza un sistema de impermeabilización correcto, el agua subterránea influye de gran forma en la permanencia de la estructura a través del tiempo.

Por otro lado, la construcción de un túnel también afecta a la naturaleza y mejor dicho a las aguas subterráneas. La descarga que se genera al interior de un túnel debido a la filtración existente y la permeabilidad del terreno es un desperdicio de los recursos de agua en la naturaleza y puede ocasionar una reducción significativa del nivel freático, causando insuficiente suministro de agua a fuentes cercanas y generando el deterioro ecológico de zonas aledañas.

En casos extremos, la descarga de aguas subterráneas ocasiona que terrenos cercanos se sequen y existan hundimientos y hasta que se generen fisuras en el suelo, causando daños estructurales a construcciones cercanas.

Según los documentos investigados, podemos decir que el agua subterránea puede influir de estas maneras:

- Puede existir la presencia de un caudal muy grande el cual va a interferir en las operaciones constructivas e incluso impedir su avance. También es probable que se erosione el suelo y pueda ocasionarse un flujo de suelo debido al aumento de contenido de agua y así reducir la resistencia del sustrato al desplazamiento.
- Debido a la presencia de agua, se produce una disminución de la resistencia del terreno alrededor del túnel excavado, lo cual va a generar inestabilidad.
- Este último, es como afecta el túnel al equilibrio ecológico el cual se encuentra el sector.

Es por esto, que se debe realizar un estudio hidrogeológico por donde se encuentra el trazado del túnel, para conocer dónde están los depósitos de agua subterránea, para estimar los caudales de infiltración que van a generarse al interior del túnel y poder establecer un sistema constructivo acorde a las situaciones que se presentan.

CAPITULO 2: SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES

IMPORTANCIA DE LA IMPERMEABILIZACIÓN DE UN TÚNEL

Dentro del macizo rocoso nos podemos encontrar con la presencia de agua subterránea, la cual puede generar filtraciones no contempladas dentro del túnel, superando el revestimiento, ya sea por la existencia de grietas o a través de las juntas de construcción. La principal función de un sistema de impermeabilización es generar un espacio libre de agua mediante revestimientos que protejan a la estructura de:

- aguas agresivas
- procesos de lixiviación de finos
- carbonatación
- cristalización de sales disueltas

Realizar un diseño adecuado de un sistema de impermeabilización para la estructura futura, significa brindar seguridad y confort a los usuarios, también aumenta la duración, la vida útil y la calidad de las obras acortando los costos de mantenimiento que se le da a la estructura durante su vida útil.

Según el Manual de diseño y construcción de túneles de carretera de los Estados Unidos Mexicanos, la entrada de agua hacia el interior del túnel causa dos efectos perjudiciales:

- El agua deteriora al concreto, al acero, en sí, al revestimiento. Con el tiempo llega a destruirse.
- El agua oxida y corroe las instalaciones auxiliares del túnel.
- Si el agua cae sobre la vía, puede generar derrapes a los vehículos.

La impermeabilización de obras subterráneas es un problema complejo y no es fácil lograr satisfactoriamente los resultados especificados por el diseñador y los requeridos por los dueños del proyecto. El problema en sí depende del tipo de proyecto que se realice y las diferentes variables que éste podría tener. Como bien se conoce en la industria, la impermeabilización a veces es uno de los principales problemas en el diseño, la ejecución y posteriormente la operación y mantenimiento del mismo (Garshol, 2009, pág. 45).

A veces, la solución necesaria es realizar la impermeabilización por el método del submarino que consiste en no permitir el ingreso de agua por ningún lado, pero normalmente se puede usar algún tipo de solución mediante drenaje llamado efecto paraguas que drena y filtra el agua hacia un sistema de drenaje que se encuentra en la parte inferior de las paredes del túnel. La elección entre el método del submarino y el método del paraguas va a tener mayor impacto en la ejecución y el costo.

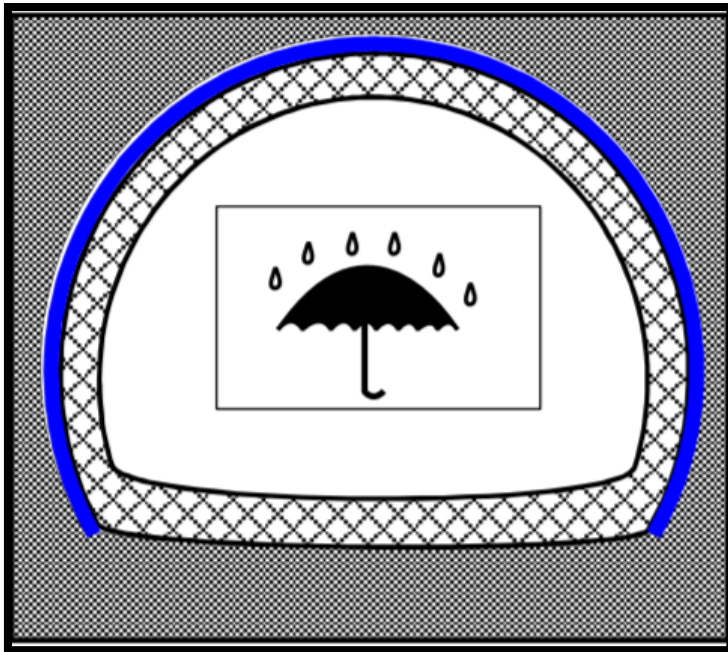


IMAGEN 2.1 – Sistema drenado.
Fuente: (Sandoval, 2005)

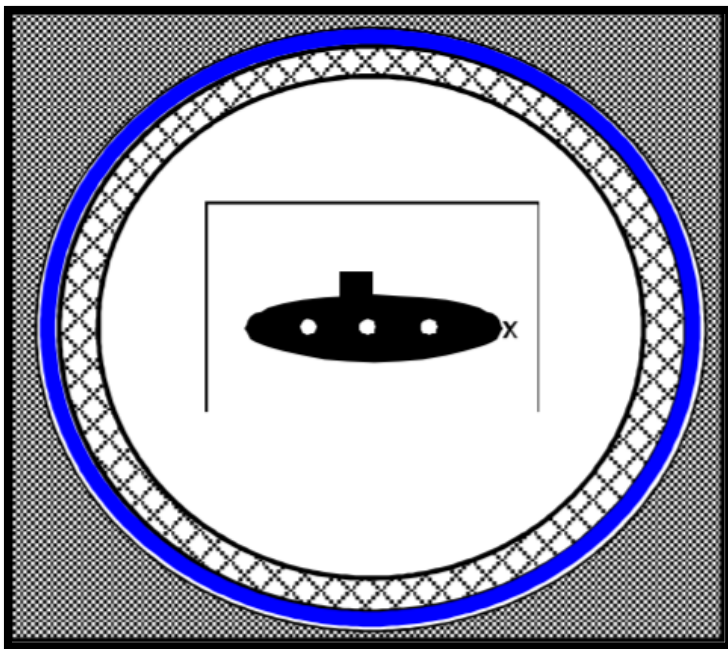


IMAGEN 2.2 – Sistema no drenado
Fuente: (Sandoval, 2005)

Los métodos más usados para obtener estructuras impermeables son:

- Inyección de cemento en los suelos
- Colocar lechada
- Revestimientos de acero
- Hormigón de baja permeabilidad
- Hormigón lanzado
- Diferentes tipos de membranas

FACTORES QUE SE TOMAN EN CUENTA PARA LA IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES

Es de suma importancia conocer los siguientes factores para poder seleccionar el tipo de impermeabilización apropiado y lograr establecer un correcto control hídrico dentro de un túnel.

1. HIDROGEOLÓGICOS

La ciencia que se ocupa del estudio del agua en el globo terrestre y además del ciclo que cumple en la atmósfera, en el suelo y el subsuelo, es la hidrología. Por ende, existen dos ramas principales en la hidrología que son la hidrología superficial y la hidrología subterránea también llamada hidrogeología, la cual se encarga del estudio de las aguas subterráneas que abarca su acopio, su paso a través del suelo y su distribución al interior de las formaciones geológicas.

La circulación de las aguas subterráneas hace que se genere un estudio de la geología, la cual permita conocer los factores hidrológicos y geológicos que condicionan su movimiento.

La hidrogeología tiene un enfoque puramente científico, pero también está inmersa en aplicaciones prácticas a las situaciones que se presentan con el agua dentro de la ingeniería. Por esto, nos vamos a centrar en el proceso que se da en el ciclo hidrológico.

Toda el agua que existe en el planeta tierra se encuentra vinculada dentro de un sistema que se conoce como “ciclo hidrológico”. Por lo tanto, las aguas subterráneas son parte de este ciclo y hay que estudiarlas junto con los demás aspectos pertenecientes al ciclo.

Toda el agua que interviene en el ciclo hidrológico viene de grandes depósitos que son los océanos, luego de cumplir su ciclo vuelve al mismo, pero como es de esperarse no todas las partículas retornan, ya sea porque se evaporó en la superficie de la tierra y luego se convirtió en lluvia o granizo, o porque fueron captadas para actividades humanas. Pero

como es un fenómeno cíclico, todo lo que entra es igual a todo lo que sale, y se establece un balance hidrológico que se representa por la siguiente ecuación:

$$P = Ev + R + I$$

Donde:

P = Total de Precipitación
Ev = Evapotranspiración
R = Escorrentía superficial
I = Infiltración

Toda el agua que se introduce al subsuelo y alimenta las aguas subterráneas está representado por la infiltración, la cual se puede dar de forma directa, es decir, por la lluvia o indirecta que es la infiltración de aguas superficiales como ríos, lagos, etc.

Debido a que un túnel es una construcción subterránea, hay que realizar las respectivas investigaciones hidrogeológicas, las cuales proporcionaran información importante para poder controlar el agua durante su excavación y funcionamiento o prevenir otros efectos indirectos e implicaciones ambientales (Gonzalez, Ferrer, & Ortuño, 2004). Principalmente es necesario conocer el caudal de infiltración del suelo donde se va a emplazar la obra, el cual va a depender de aspectos:

- **GEOLÓGICOS**

Son dos factores geológicos los que interviene ante la presencia de agua subterránea:

- El primero es la naturaleza de las rocas, el cual determina la existencia de fallas, plegamientos, el grado de erosión de la roca, en otras palabras, la permeabilidad del acuífero.
- Y el segundo es la estructura de los acuíferos, el cual nos da la capacidad de almacenar y transmitir agua, teniendo el conocimiento de discontinuidades. Este factor condiciona el movimiento de aguas subterráneas.

- **CLIMATOLÓGICOS**

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta para poder conocer el caudal de infiltración, son los elementos del clima, los cuales van hacer variar la cantidad de agua dependiendo del sector en donde se realiza el estudio. Estos elementos son:

- Temperatura
- Precipitación
- Contenido de agua en el suelo

- Viento
- Humedad relativa
- Insolación
- Nubosidad
- Visibilidad
- Presión atmosférica
- Heladas, tormentas, etc.
- Tiempo significativo

En el Ecuador estos elementos se los puede conocer a través del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

- **GEOMORFOLÓGICOS**

La geomorfología como su nombre lo dice es el estudio de la forma de la tierra, se encarga principalmente de su relieve, es decir, las condiciones de la superficie y las características del suelo. Mediante este aspecto ligado a la hidrogeología podemos estimar la escorrentía superficial que se genera y la posibilidad de infiltración que posee el terreno.

Según el documento *Relieve y geomorfología del Ecuador* de Alain Winckfll, la geomorfología del Ecuador es caracterizada por el hecho de que la Cordillera de los Andes atraviesa nuestro país de norte a sur y genera una división fisiográfica (Winckfll, 1999, pág. 14).

- En la Sierra, se presenta una gran barrera montañosa de la Cordillera de los Andes.
- En la costa, existe la presencia de relieves colinados y grandes llanuras.
- En el oriente, hay relieves monótonos no tan pronunciados.

- **PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS**

Los acuíferos poseen parámetros fundamentales de las cuales dependen, estos establecen el funcionamiento del mismo ante determinadas acciones exteriores. Estos son:

- **Porosidad:** se define como la relación entre el volumen de vacíos V_h y el volumen total V_t del suelo, depende de la naturaleza del terreno, la granulometría de los granos del suelo, la disposición en las que se encuentran, su forma y el grado de compactación entre ellas.

$$P = \frac{V_h}{V_t} \times 100$$

- **Permeabilidad:** En el libro *Ingeniería Geológica* se define la permeabilidad como “un parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de la misma, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica” (Gonzalez, Ferrer, & Ortuño, 2004, pág. 54).
- **Transmisividad:** es un parámetro que evalúa la capacidad de transmitir agua de los acuíferos. Toma en cuenta la textura del acuífero, las características del fluido y las características estructurales y geométricas. Es el producto de la conductividad hidráulica k y el espesor del acuífero b .

$$T = kb$$

- **Gradiente Hidráulico:** se define como la pérdida de altura piezométrica dividido para la longitud recorrida por el fluido.

2. CONDICIONES DEL TERRENO

Como ya se lo mencionó en el anterior capítulo, la condición en la que se encuentra el terreno es un factor muy importante que se tiene que conocer, ya que éste nos permite determinar el tipo de revestimiento que se va a utilizar y poder seleccionar el sistema constructivo y el de impermeabilización más apropiado.

Los tipos de suelo que nos encontraremos son:

- **TERRENO DURO:** Al encontrarse con este tipo de terrenos se evita la disposición de revestimientos para sostener el terreno y solo es necesario eliminar irregularidades, rellenar fisuras mediante hormigón lanzado, colocar un sistema de impermeabilización y finalmente realizar la estructura final que soportara las presiones ejercidas por el terreno y el agua que se encuentre a su alrededor.
- **TERRENO QUEBRADIZO:** Después de realizar el soporte se coloca el sistema de impermeabilización y finalmente el revestimiento estructural.
- **TERRENO BLANDO:** De igual manera la colocación del soporte debe ser de inmediato junto con el sistema de impermeabilización ya que la seguridad es baja en este tipo de terreno.

3. USO DEL TÚNEL

Un buen sistema de impermeabilización toma en cuenta la utilización definitiva de la obra y, por lo tanto, el grado de estanqueidad o cantidad de filtración que se permita.

Este documento tiene el objetivo de proponer un sistema de impermeabilización, el cual está basado en una norma, por ende, vamos a utilizar la tabla de definición de impermeabilidad para el diseño de túneles y galerías subterráneas de la norma española UNE 104424 como se muestra en la tabla 1, para no tener exigencias innecesarias, ya que esto podría tener consecuencias importantes en el costo de la obra.

Grado de Imperm.	Características de humedad	Utilización de la obra	Filtraciones de agua l/m ² en 24 horas
1	No permitida la difusión de vapor desde el exterior	<ul style="list-style-type: none">• Lugares secos:• Locales refrigerados• Presencia continua de personas• Almacenes sensibles a humedad	0
2	SECO Permitida la difusión de vapor	<ul style="list-style-type: none">• Instalaciones militares y locales húm.• Locales con instalaciones de energía• Locales subterráneos de uso general	0
3	SECO	<ul style="list-style-type: none">• Almacenes y locales comerciales• Estaciones de metro	< 0,001
4	CASI SECO	<ul style="list-style-type: none">• Túneles de autopistas• Túneles de montaña• Túneles ferroviarios de alta velocidad	< 0,01
5	Filtraciones capilares	<ul style="list-style-type: none">• Aparcamientos• Túneles de carretera y en roca	< 0,1
6	Ligero goteo de agua	<ul style="list-style-type: none">• Túneles de ferrocarril• Líneas de metro	< 0,5
7	Goteo de agua	<ul style="list-style-type: none">• Túneles de alcantarillado	< 1,0

TABLA 1 - Definición de impermeabilización para el diseño de Túneles y galerías
Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 49)

4. CONDICIONES DEL AGUA

El tipo y la calidad de agua que se encuentre en la zona son factores primordiales para la selección de un sistema de impermeabilización.

Durante el proceso del ciclo hidrológico, ya cuando el agua ha topado superficie terrestre, debido a la gravedad el líquido comienza a penetrar el suelo y a descender lentamente, mejor dicho, desciende dependiendo de la trayectoria de los poros y las posibles fisuras que presente el terreno. Ya que dependiendo de la porosidad y de la permeabilidad del terreno se va a dar el caudal de infiltración que es lo esencial de conocer para nuestro estudio.

Al momento de encontrar un estrato impermeable el agua sigue su movimiento lateralmente o se estanca, acumulándose cada vez más, y si no existe una capa superior impermeable se crea una capa hídrica llamada nivel freático.

No toda el agua que desciende llega a acumularse en el nivel freático. Por encima de él, parte del agua de infiltración es retenida y tiende a crear una pequeña membrana de agua que envuelve a los granos contenidos en el terreno, dando lugar a la franja capilar. Como es de suponerse, debajo de esta franja nos encontramos con una zona de saturación y en la parte superior tenemos la zona de aireación y la zona de evaporación.

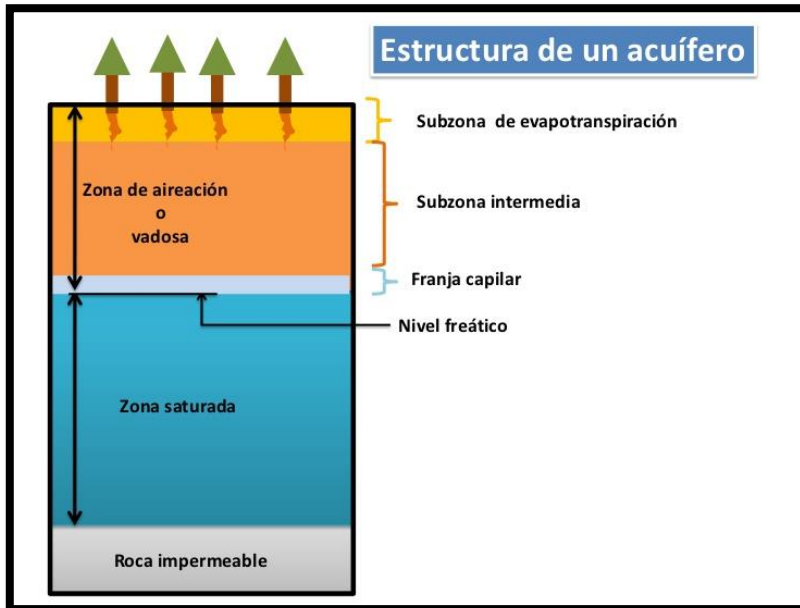


IMAGEN 2.3 - Estructura de un acuífero

Fuente: <https://image.slidesharecdn.com/geologia-tecnologia-sociedad2-120930013335-phpapp02/95/geologia-tecnologiasociedad2-27-728.jpg?cb=1348968895>. Murcia, octubre 2017.

Elaborado por: Licenciado Francisco Cáscales.

La construcción de túneles que se encuentren en zonas de aguas subterráneas puede estar en la zona de franja capilar o en la zona de saturación, por lo que hay que tomar distintas medidas para la impermeabilización en cada zona.

- **IMPERMEABILIZACIÓN EN FRANJA CAPILAR**

La impermeabilización debe ser total, es decir, en toda la construcción. Sellando todos los poros existentes, ya que, según las leyes de los capilares, el agua podría ingresar y humedecer y dañar la estructura.

- **IMPERMEABILIZACIÓN EN LA ZONA DE SATURACIÓN**

La impermeabilización tiene que ser flexible y debe resistir la presión estática que se genera por el agua. Por motivos de no generar presión al túnel, es recomendable encausar el agua hacia el drenaje del túnel.

- **IMPERMEABILIZACIÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Al igual que la anterior, se debe establecer un sistema de impermeabilización flexible y resistente a la presión generada por el agua subterránea. Por motivos de seguridad en la construcción del túnel, se recomienda bajar el nivel freático mediante métodos existentes como el de introducir aire comprimido.

La elección de los materiales para realizar el sistema de impermeabilización en cualquier zona va a depender de la composición química del agua y del suelo, debido a que algunas sustancias que se encuentran dentro de ellos pueden atacar al sistema de impermeabilización o al hormigón de la estructura.

En los siguientes dos cuadros se muestra los agentes agresivos y los efectos que tienen sobre el hormigón, al igual que se aclara cuáles son los factores que determinan su agresividad.

Grupos	Agente agresivo	Efecto sobre el hormigón
Efectos mecánicos	Carga, sobrecarga, choque. Impactos y rozamientos. Agua corriente y aire.	Grietas, principalmente en el conglomerante. Erosiones. Trituración. Erosión, cavitación.
Efectos físicos	Variaciones de temperatura y diferencias. Cambios de humedad y no uniformidad. Fuego. Temperatura alta. Corriente eléctrica y radiación.	Grietas, fallos en la unión cemento/árido. Grietas y pérdida de unión cemento/árido. Grietas y cambios químicos. Corrosión armaduras, disolución enlace cemento/árido.
Efectos químicos	Aire y otros gases. Aguas agresivas. Productos químicos. Suelos y suelos minerales.	Anulación enlace pasta/árido, SH_2 , SO_2 , CO_2 y NH_3 reaccionan. Anulación unión pasta/árido. Reacciones de SO_4H_2 ; sulfatos aguas carbónicas, cloruros. Reacciones de ácido y sales ácidas. Reacciones de ácidos débiles, de sulfatos zeolitas.
Efectos biológicos	Vegetación. Microorganismos (bacterias, formas microscópicas de vida orgánica).	Fisuras. Ataque por jugos. Humedad. Formación de sulfatos. Relajación mecánica de la textura.

TABLA 2 - Clasificación de los agresivos y sus efectos

Fuente: (O. Valenta, *Simp. Int. Quim. Del Cemento en Tokio, 1968*)

De una atmósfera	{	Contenido en gases agresivos. Contenido en polvo. Contenido en humedad.	
De agua	{	Procedentes del agua	{
		Procedentes del régimen de funcionamiento	{
			— Gases disueltos (CO ₂ ; SO ₂ ; etc. — pH. — Sales disueltas. — Temperatura. — Presencia de microorganismos (bacterias anaerobias y aerobias).
			— Turbulencia. — Inmersión intermitente.
De un suelo	{	— Porosidad. — Conductividad eléctrica. — Sales. — Grado de humedad. — Corrientes parásitas.	

TABLA 3 - Factores que determinan la agresividad

Fuente: (O. Valenta, Simp. Int. Quim. Del Cemento en Tokio, 1968)

Nos vamos a centrar en los efectos químicos que causan las aguas agresivas, los suelos y los suelos minerales al hormigón, para conocer la gran importancia que tiene el establecer un sistema de impermeabilización en la construcción de un túnel.

A continuación, se explicarán los efectos perjudiciales que se generan en el hormigón al estar en contacto con estos agentes agresivos durante un tiempo prolongado como lo está un túnel.

Según Jean Pierre Olivier en su documento “Durabilidad del Hormigón”, existen 3 reacciones químicas que ocasionan el deterioro del Hormigón:

- **Reacciones entre las aguas agresivas y los componentes de la pasta de cemento endurecido:** En esta reacción se producen 3 casos. El primer caso es que se remueven los iones Ca⁺⁺ como producto soluble, lo que hará que se incremente la porosidad y la permeabilidad del hormigón. El segundo caso se remueven los iones Ca⁺⁺ como productos insolubles no expansivos, lo que provocara lo mismo que el primer caso. Y finalmente en el tercer caso se producirá una sustitución de reacciones reemplazando Ca⁺⁺ en C-S-H, lo cual generará una pérdida de resistencia y rigidez del Hormigón.
- **Reacciones que involucran hidrólisis y lixiviación de los componentes de la pasta de cemento endurecido:** al producirse estos dos procesos en el hormigón, se incrementará la porosidad y la permeabilidad del Hormigón, lo cual desencadenará en la pérdida de alcalinidad, pérdida de masa, se acelerará el

proceso de deterioro del hormigón y por consiguiente se disminuirá su resistencia y rigidez.

- **Reacciones que involucran formaciones de productos expansivos:** al producirse estos productos, se incrementarán los esfuerzos internos de la estructura y por lo tanto se producirán deformaciones, agrietamientos, desprendimientos del material ocasionando la pérdida de resistencia y rigidez del hormigón.

Como podemos notar, las reacciones que se producen debido a la presencia de estos agentes agresivos siempre van a generar la pérdida de la resistencia y la rigidez del hormigón. Por lo tanto, es crucial realizar un hormigón de calidad, lo cual implica una “calidad de su composición, tanto desde el punto de vista de la granulometría de sus áridos como el de su contenido en cemento, que debe de ser lo bastante rico; el contenido de agua, que debe de limitarse estrictamente a asegurar la impermeabilidad y la compacidad del hormigón y, finalmente, calidad en cuanto a su compactación y curado, cuyo cuidado es muy primordial” (Jose Escorihuela, s.f.). Y en el caso de un túnel, también dotar de un sistema de impermeabilización que proteja el revestimiento definitivo de estos procesos perjudiciales que pronto van a derivar en mantenimientos costosos o en el caso no deseado, al perder la resistencia de diseño, llegue a colapsar la estructura.

SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN

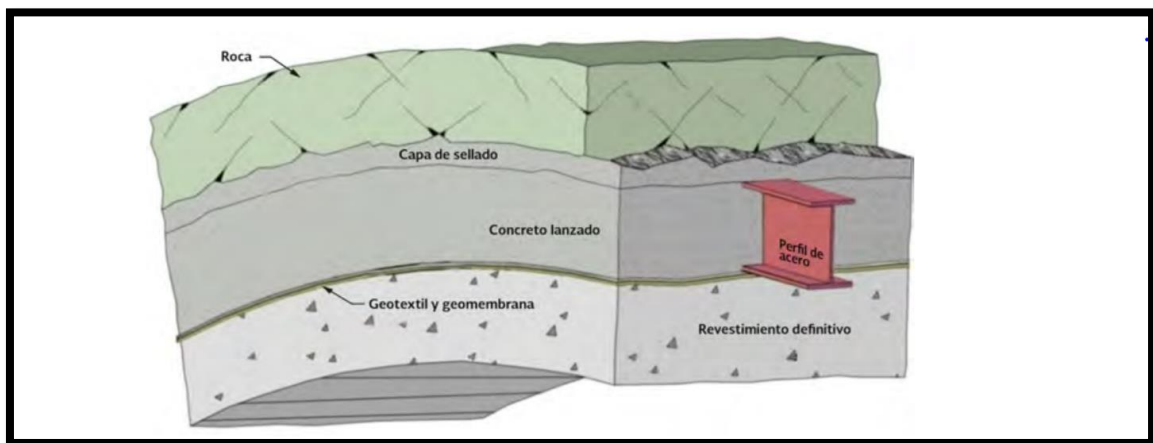


IMAGEN 2.4 - Ubicación del sistema de impermeabilización en túneles

Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017, pág. 2)

Dentro de los métodos más utilizados para obtener estructuras impermeables se encuentra el uso de diferentes tipos de membranas que van a ser utilizadas dentro de un sistema de impermeabilización, el cual según las filtraciones que se presentan y el tipo de revestimiento que se le dé al túnel, puede comprender de una hasta cuatro etapas, cada una con su propia naturaleza, presentadas de la siguiente manera:

IMPERMEABILIZACIÓN PRIMARIA

Esta es la primera etapa del sistema de impermeabilización, la cual se encarga de realizar el taponamiento, recogida y recolección de filtraciones existentes después de haber realizado la excavación, las cuales van a permitir continuar con la realización de la impermeabilización intermedia y principal.

Esta etapa tiene como objetivo, canalizar y conducir las filtraciones puntuales que se presenten a lo largo del túnel hacia el drenaje longitudinal del mismo. Normalmente se recomienda usar el método Oberhasli, el cual se utiliza para túneles sin revestimiento de hormigón encofrado y consiste en perforar una longitud de 1 metro con un diámetro mínimo de 30 mm, dependiendo del caudal de infiltración que exista, en el punto donde se encuentre un goteo. Luego, una tubería de PVC de 80mm de diámetro o mayor, se fija a la perforación para poder conducir los caudales captados hacia el sistema de drenaje longitudinal del túnel.

Todo este procedimiento, garantizará que no exista o que se disminuya la presión de las aguas de filtración a través del drenaje longitudinal que deberá tener un diámetro mayor a 20cm, para así facilitar los trabajos de mantenimiento y conservación del mismo. El diámetro del dren dependerá del caudal que se tiene que evacuar.

IMPERMEABILIZACIÓN INTERMEDIA

Al momento de finalizar la excavación, se generan alteraciones en el suelo, que tienen que ser solucionadas mediante la instalación de un soporte, luego de concluir con la impermeabilización primaria.

Este soporte servirá como sostén de la impermeabilización principal y para poder realizar una buena instalación, así como generar un adecuado funcionamiento posterior del sistema, su regularización es esencial.

Esta etapa consiste en la aplicación de hormigón proyectado o morteros para generar un soporte, el cual según la norma española UNE 104424 debe cumplir los siguientes requisitos:

- Resistencia del hormigón a compresión simple debe ser mayor o igual a 35MPa.
- Se debe usar cementos de bajo calor de hidratación.

- La relación agua/cemento debe ser menor o igual a 0.4
- Usar sílice coloidal y agentes que reducen el rebote del hormigón lanzado.
- Usar fibras sintéticas estructurales, lo que incrementara la durabilidad e impermeabilidad del hormigón al no producirse corrosión de las mismas.
- No debe haber irregularidades con un radio menor a 20cm.
- La profundidad de la irregularidad no debe exceder los 15cm con respecto a la superficie de terminación.
- La relación profundidad/extensión en cualquier irregularidad que se presente, tiene que ser menor o igual a 1/5.

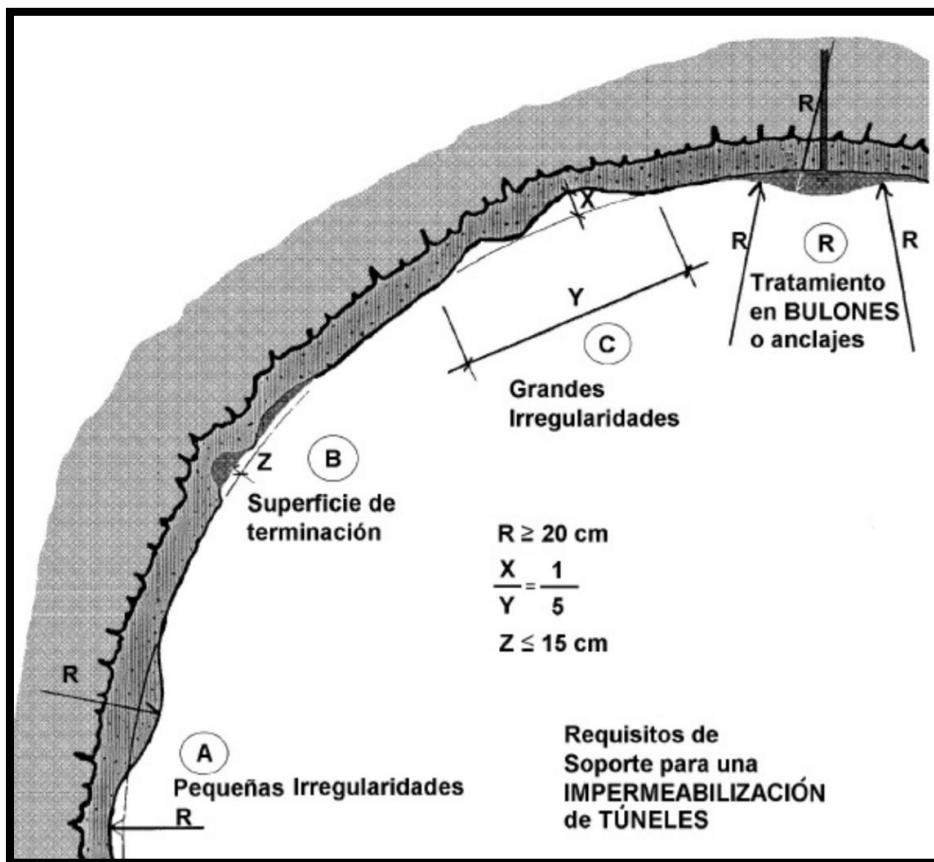


IMAGEN 2.5 - Requisitos del soporte según la Norma Española 104424

Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 36)

Cualquier elemento que sobresalga del soporte, ya sean anclajes o bulones, deben ser reducidos en la parte no funcional con el propósito de no causar daños al sistema de impermeabilización principal.

La impermeabilización intermedia puede ser de:

- **PROTECCIÓN:** Consiste en la aplicación de hormigón lanzado con un espesor no menor a 5cm con el propósito de tapar elementos de anclaje y bulonado para

que no exista punzonamiento al sistema de impermeabilización. Este revestimiento también evitará los posibles fallos que se hayan podido ocasionar durante la impermeabilización primaria.

- **REGULARIZACIÓN:** Se aplica hormigón lanzado o morteros preparados con la finalidad de cumplir la geometría que se muestra en la imagen 2.5 y para sostener la impermeabilización principal. EL espesor de este método varía de 4cm a 25cm dependiendo del sistema de sostenimiento que posea el túnel.

Es recomendable emplear hormigones que obtengan altas resistencias iniciales y tengan un fraguado veloz. También es necesario realizar una limpieza con agua a una presión mayor de 200 atmósferas al momento que el hormigón cumpla la edad mínima requerida, para poder obtener un soporte sin partículas sueltas u otras alteraciones que puedan dañar la membrana que se va a colocar posteriormente.

- **IMPERMEABILIZACIÓN PRINCIPAL**

En este trabajo, se propone la utilización de un sistema de impermeabilización con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC, las cuales van a asegurar la completa estanqueidad de la galería o túnel.

Este sistema está integrado por parte de la geomembrana como el componente impermeable y un geotextil para proteger de posibles daños mecánicos a la lámina de PVC, así como de drenaje para la evacuación de las aguas que se lleguen a infiltrar.

Según la Norma Española UNE 104424, la impermeabilización principal debe cumplir con los siguientes requisitos (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 13):

- La superficie existente dentro del túnel tiene que estar protegida y envuelta de manera durable contra el agua que se infiltre.
- Se tiene que adaptar completamente sin inconvenientes a todas las irregularidades que se presenten en el soporte. Para que no se perfora la membrana debe poseer una resistencia y alargamiento suficiente.
- El geotextil que se utilice debe proteger la membrana y evacuar el agua filtrada.
- Al utilizar hormigón bombeable, la impermeabilización estará sometida a presiones de hasta 200KN/m^2 , por lo que la membrana debe resistir estas cargas generadas por el revestimiento y también el empuje del macizo rocoso.
- El sistema tiene que resistir los movimientos de retracción, fluencia, y las deformaciones por temperatura del soporte y del revestimiento, así como las vibraciones que se presenten, sin que el efecto impermeable se altere.
- La geomembrana y el geotextil no se deben pudrir, tienen que resistir al envejecimiento, no se deben alterarse ante acciones químicas y tienen que ser

duraderas al encontrarse en contacto con el hormigón, mortero, aguas de filtración y otros materiales del soporte y revestimiento.

- La membrana debe ser soldable y su unión debe ser verificada mediante controles de soldadura.

CONTROL DE CALIDAD

Para el tema del soporte, es recomendable seguir los parámetros ya establecidos anteriormente, ya que, si se generan pliegues en la geomembrana, esta puede fallar en su función (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015).

Se tiene que realizar una revisión visual para no encontrarse con componentes que puedan punzar a la membrana y dañarla.

ACERCA DE LA NORMATIVA USADA

Como ya lo dije anteriormente, el principal objetivo de este trabajo es proponer la utilización de un sistema de impermeabilización mediante la utilización de láminas termoplásticas prefabricadas de PVC en los futuros túneles que se puedan construir en el Ecuador.

Por obvias razones, y por falta de normativa ecuatoriana, este documento se basa y se sustenta en la Norma Española UNE¹ 104424, la cual tiene de título “Materiales Sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC”.

Me permito utilizar esta Norma por varias razones, pero las dos principales son: Primero, por el mismo hecho de la definición de la palabra Norma; que según el artículo 8 de la ley de 1992 del Boletín Oficial del Estado de España, “una norma es un documento de aplicación voluntaria que contiene especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico. Es el fruto del consenso entre todas las partes interesadas e involucradas en la actividad objeto de la misma y deben ser aprobadas por un organismo de normalización reconocido” (NORMALIZACIÓN ESPAÑOLA, 2017),

Ahora bien, el objetivo principal de la Normalización. es elaborar documentos que contienen: especificaciones técnicas, normas que van a ser utilizados por los medios de control para garantizar la calidad y la seguridad de las respectivas actividades o productos que se realicen.

¹ la Asociación Española de Normalización, UNE, es el único Organismo de Normalización en España, y como tal ha sido designado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad ante la Comisión Europea e internacional.

Utilizar esta Norma significa dar un paso que contribuye ampliar el mercado del sector de la construcción, crecer en innovaciones, crear una responsabilidad social del uso de normas para frenar la construcción informal y tratar de dar una mejora económica y ambiental a la sociedad.

Segundo, para realizar un sistema de impermeabilización lo primordial es conocer los caudales de infiltración de la zona de influencia del túnel que varían según parámetros geológicos, que fácilmente pueden ser estudiados y determinados en los estudios previos de un proyecto de construcción de un Túnel, lo demás ya son procedimientos y parámetros que seguir los cuales han sido establecidos de acuerdo con experiencias adquiridas.

CAPITULO 3: MATERIALES PARA LA IMPERMEABILIZACIÓN PRINCIPAL

La calidad de la impermeabilización va a depender directamente de:

- La calidad y el tipo de materiales que se utiliza
- El lugar junto con las condiciones de trabajo
- El equipo de trabajo utilizado

Como la impermeabilización principal básicamente es la colocación de un Geotextil y una lámina impermeabilizante, ya sea ésta una membrana nodular, una membrana asfáltica o de la que se va hablar que es una membrana de PVC, detallaré sus funciones en el sistema de impermeabilización y los requisitos que deben cumplir cada uno de acuerdo con lo que se especifica en la Norma Española UNE 104424.

Geotextil

- **Definición de Geotextil**

Es un material textil plano, deformable y elaborado mediante el uso de fibras poliméricas. Éste es utilizado en trabajos de ingeniería civil y en aplicaciones geotécnicas para cumplir ciertas funciones como:

- Filtración
- Separación
- Refuerzo
- Protección
- Drenaje

Los geotextiles están dentro de un grupo mayor que son los geo sintéticos, dentro de los cuales se encuentran también los geo compuestos y las geomembranas.

La clasificación de los geotextiles se muestra en la siguiente imagen:

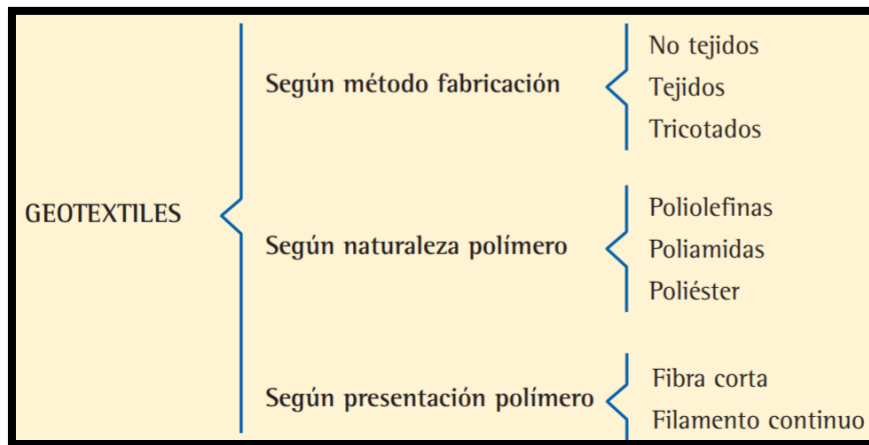


IMAGEN 3.1 - Clasificación de los Geotextiles

Fuente: (Ballester, Castro, & Gil, 2000)

- **Función del Geotextil en el sistema de impermeabilización**

El geotextil dentro del sistema de impermeabilización que se propone en este trabajo tiene dos funciones principales, las cuales son:

- **Protección:** Dentro del arco excavado, se generan modificaciones en el estado tensional del mismo, provocando movimientos en el terreno. Estos movimientos pueden generar esfuerzos mecánicos muy grandes a la lámina de impermeabilización, provocando la rotura o la perforación de la misma. Para prevenir esto, se colocan geotextiles intermedios que van a proteger a la geomembrana de PVC.
- **Drenaje:** Otra función del geotextil es drenar el agua sobre su plano hacia el drenaje longitudinal del túnel, así evita la generación de presión hidrostática sobre el sostenimiento.

- **Elección del Geotextil**

Según la norma española UNE 104424, los geotextiles que hay que utilizar deben ser:

- No- tejidos
- Polipropileno 100%
- Unidas mediante punzonado
- Sean resistentes a soluciones de alta alcalinidad

Y deben cumplir con las propiedades hidráulicas y mecánicas que se muestra en la siguiente tabla.

Características	Unidad	Ensayo	A cielo abierto		Con hormigón proyectado			Dovelas
			Bajo sistema	Sobre sistema	Árido 0-4mm	Árido 0-8mm	Árido 0-16mm	
Valores mínimos absolutos								
Res. Tracción	Kn/m	UNE-EN ISO 10319	≥ 15	≥ 31	≥ 12	≥ 15	≥ 18	≥ 15
Alargamiento	%	UNE-EN ISO 10319	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45
Res. Punzonado estático - CBR	KN	UNE-EN ISO 12236	≥ 2,5	≥ 5	≥ 1,9	≥ 2,5	≥ 3,0	≥ 2,5
Eficiencia	%	UNE-EN 13719	≤ 2,1	≤ 1,1	≤ 2,2	≤ 2,1	≤ 2,0	≤ 2,1
Res. Cono	mm	UNE-EN ISO 13433	≤ 24	≤ 12	≤ 27	≤ 24	≤ 21	≤ 24
Cap. Flujo (20kPa i=1)	m ² /s	UNE-EN ISO 12958	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Durabilidad			Resistentes a soluciones de alta alcalinidad					

TABLA 4 - Definición de las propiedades mecánicas e hidráulicas mínimas del geotextil, según el tipo de túnel.

Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 19)

También, el geotextil debe resistir a la intemperie un tiempo de 14 días luego de haber sido instalado, pero se recomienda que el material no esté expuesto mucho tiempo.

Cabe mencionar que los valores de la tabla 4, son valores mínimos absolutos requeridos, pero se recomienda diseñar y especificar el geotextil de acuerdo con las condiciones de la obra.

- **Recepción del Geotextil**

Las empresas dedicadas a la fabricación de geotextiles presentan su producto en rollos debidamente empaquetados y con una etiqueta que contenga:

- La marca
- El tipo
- Dimensiones
- Número de lote de fabricación

- **Colocación del Geotextil**

El geotextil se fijará al soporte de hormigón proyectado que se realizó previamente mediante el uso de clavos con arandelas o discos fabricados del mismo material que la geomembrana PVC. El número de anclajes va a depender de la geometría del túnel, la empresa colombiana FILMTEX que ha venido realizando la instalación de este sistema

ya por varios años recomienda tener una densidad de instalación de 4 unidades por metro cuadrado.

Los rollos de geotextil que se utilicen se colocaran de forma transversal al eje del túnel, teniendo una longitud de solape mínima de 20cm y si el solape es termo fijado podrá realizarse un solape de 10cm como mínimo, todo esto para tener una superficie totalmente cubierta y la membrana impermeabilizante se encuentre protegida.

El geo sintético tiene que envolver el dren longitudinal del túnel para poder garantizar la adecuada salida del agua infiltrada.

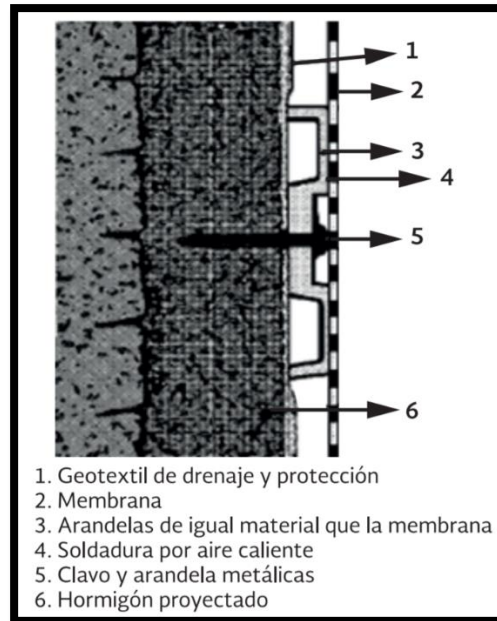


IMAGEN 3.2 - Anclaje del geotextil y soldadura de la membrana

Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 37).

Lamina de impermeabilización de PVC

- **Definición de PVC**

El PVC viene de las siglas en inglés *polyvinyl chloride* que significa cloruro de polivinilo. Según el diccionario de la Real Academia Española de la Lengua, es una “resina termoplástica obtenida por polimerización de derivados del cloruro de vinilo, usada frecuentemente para aislamientos y tuberías.”²

En este trabajo nos centraremos en las geomembranas elaboradas de PVC, que es la transformación de la resina termoplásticos en láminas o membranas sintéticas con alta

² “Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua” 22º edición.
<http://dle.rae.es/?id=UkOAnCk>, Accesos diciembre de 2017

resistencia, baja permeabilidad y una gran elasticidad que poseen espesores muy bajos mediante un proceso de calandraje y doblado.

Las propiedades antes mencionadas de estos materiales hacen que las geomembranas de PVC sean muy usadas en proyectos de estanqueidad como es la impermeabilización de túneles.

- **Generalidades de la geomembrana PVC para la impermeabilización.**

Estas láminas de PVC tienen varias propiedades que nos permiten solucionar condiciones desfavorables como:

- La filtración de aguas agresivas hacia construcciones subterráneas.
- Adaptación de la membrana a cualquier irregularidad que presente el terreno o el soporte realizado.

- **Ventaja del uso de geomembranas de PVC**

La geomembrana de PVC es un material muy usado para impermeabilización de túneles a lo largo de todo el mundo, debido a sus propiedades y las ventajas que ofrece:

- Es capaz de recubrir totalmente la zona que se quiere impermeabilizar, garantizando la estanqueidad de la misma.
- Como ya se lo ha mencionado anteriormente, la membrana se adapta al relieve del terreno o soporte que se tenga.
- Mediante el correcto anclaje de los clavos y arandelas, la membrana esta fija al soporte para evitar posibles desplazamientos.
- La geomembrana de PVC es resistente a la acción de aguas agresivas que se encuentran en el subsuelo.
- Es capaz de soportar cambios de temperatura y presión.
- Resiste la acción de los microorganismos existentes en el suelo.
- La lámina de PVC es resistente al envejecimiento y no es alterable químicamente.
- Las láminas se pueden unir mediante un proceso de soldadura.

- **Elección de la Lámina impermeabilizante**

En la normativa usada para realizar este documento, se recomienda usar laminas termoplásticas homogéneas de PVC sin armar de mínimo 2mm de espesor para la construcción de un sistema de impermeabilización de túneles, y debe cumplir con los requisitos que se muestran en la siguiente tabla:

Características	Norma	Unidades	Especificaciones
Espesor nominal	UNE - EN 1849-2	mm	2
Resistencia a la tracción	UNE - EN ISO 527-1 y UNE - EN ISO 527-3	N/mm ²	L ≥ 15 T ≥ 15
Alargamiento a la rotura	UNE - EN ISO 527-1 y UNE - EN ISO 527-3	%	L ≥ 300 T ≥ 300
Resistencia al desgarro	UNE - ISO 34-1	kN/m	≥ 40
Estabilidad dimensional tras envejecimiento acelerado (6 h y 80°C)	UNE - EN ISO 1107-2	%	≤ 2
Resistencia Punzonado Estático (CBR)	UNE - EN ISO 12236		≥ 2,2
Resistencia perforación a raíces	UNE - CEN/TS 14416 EX		Conforme
Resistencia a la oxidación	UNE - EN 14575		Conforme
Comportamiento al fuego. Inflamabilidad ante llama única	UNE - EN ISO 11925-2		Clase E
Plegabilidad a baja temperatura	UNE - EN 495-5		Sin roturas a - 20°C
Color	Opacas, opacas bicolor o traslúcidas		

TABLA 5 – Requisitos para láminas de PVC de 2mm de espesor para la impermeabilización de túneles
Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 20)

Se recomienda tener anchos de lámina que permitan realizar el menor número de soldaduras al interior del túnel y la longitud de las láminas deben ser de acuerdo con el perímetro del túnel.

- **Recepción de la lámina impermeabilizante**

Las empresas dedicadas a la fabricación de geomembranas de PVC presentan su producto en rollos debidamente empaquetados y con una etiqueta que contenga:

- La marca
- El tipo
- Longitud
- Espesor
- Número de lote de fabricación

- **Colocación de la lámina impermeabilizante**

Antes de colocar la lámina impermeabilizante, se debe efectuar los trabajos de colocación de discos de fijación, los cuales estarán sobre el geotextil y debidamente anclados al soporte mediante el uso de clavos o, perforación y taco. Estos servirán para fijar la membrana al soporte.

Los discos de fijación:

- Deben ser de igual material que la lámina impermeabilizante para poder crear una unión mediante soldadura.
- Deben poseer una menor resistencia a la ruptura que la lámina impermeabilizante, ya que si se generan tensiones cuando se realiza el hormigonado del revestimiento definitivo, no se rompa la lámina sino el disco.
- Deben tener una superficie entre 50 cm² a 60 cm², en el caso de que los discos sean circulares deben tener de 8 a 9 cm de diámetro.
- Se colocarán alrededor de una cantidad promedio de 2 unidades por metro cuadrado. En la zona de la clave será mayor la densidad de discos que en los hastiales.
- Los anclajes de los discos deben resistir el peso de la impermeabilización (geotextil y geomembrana) y posibles bolsas de agua que se puedan generar.

Los rollos de la geomembrana PVC se colocarán de forma transversal al eje del túnel, sujetándose mediante un proceso soldadura o por termofusión con aire caliente a los discos ya instalados. La norma española UNE 104424 sugiere “dejar una superficie mínima de contacto en la soldadura disco-membrana de al menos 40 cm²” (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 22).

La geomembrana tiene que permanecer sin tensión, de tal forma que resista de manera adecuada las tensiones que se van a generar durante la fundición del revestimiento definitivo.

La colocación de las láminas va a ser igual sucesivamente, generando solapes de 8cm para poder realizar una buena soldadura y unir los rollos a lo largo del túnel. Para lograr una buena instalación de la geomembrana se debe utilizar:

- Andamios simples: son los más utilizados para instalar el sistema de impermeabilización debido al bajo costo en comparación con los andamios hidráulicos. Estos andamios tienen la facilidad de adaptarse a las secciones del túnel, pero el proceso de instalación es lento.
- Andamios hidráulicos: son los más modernos y facilitan la instalación gracias al sistema de rodillos que posee.

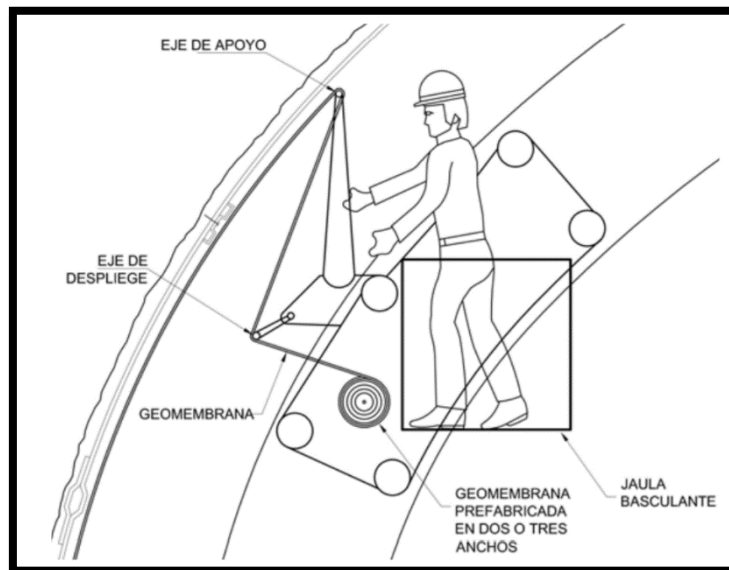


IMAGEN 3.3 – Esquema tipo de andamiaje para colocación automática

Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación, 2015, pág. 38)

Es recomendable no realizar tantas soldaduras al interior del túnel, por lo que se debe prefabricar láminas que tengan longitudes iguales a la sección del túnel.

En la contra bóveda o zonas puntuales se debe proteger la geomembrana mediante la colocación de un geotextil o una membrana que tenga el mismo espesor que la lámina impermeabilizante. Y en la solera, para prevenir perforaciones y dar mayor protección mecánica se debe poner una capa de 5cm de espesor de mortero antes de realizar el revestimiento definitivo.

- **Soldadura de Membrana de PVC**

Para realizar las uniones de las membranas de PVC a lo largo de todo el túnel y generar un medio estanco, existen dos métodos:

- **Soldadura por cuña caliente:** Este método consiste en unir temperatura y láminas termoplásticas mediante una velocidad y una presión de calentamiento exactas. La temperatura se aplica mediante el contacto de una cuña calefactora, el cual se le aplica antes de pasar los rodillos. A medida que la máquina avanza, los rodillos presionan las partes ya calentadas creando dos líneas de soldadura separadas por un canal de aire que próximamente se lo utilizará para la comprobación de la soldadura. La presión, la temperatura y la velocidad se ajustan de acuerdo a las condiciones climáticas, por lo tanto, siempre están relacionados entre ellos. Los parámetros de la soldadura pueden variar en función de la máquina que se utilice, la membrana que se va a soldar y la temperatura ambiente



IMAGEN 3.4 – Máquina para soldar geomembranas

Fuente: <https://www.bbtechnics.com/se/produkt/category/leister-wplastic>. Bisnode, 2017

- **Soldadura por aire caliente:** Este método de soldadura es lo mismo que el anterior, pero la diferencia radica en que la temperatura que se aplica a la membrana es mediante un calentador de aire y no por contacto de la cuña calefactora como lo es en el otro método. Este método usualmente es manual, por lo tanto, es recomendable para la soldadura de la membrana con los discos de fijación.

CONTROL DE CALIDAD DE LA SOLDADURA

Se debe realizar una gráfica donde se muestre la manera que están colocados los geo sintéticos (geotextiles o geomembranas), ubicar las diferentes láminas que se han colocado, cada una con su número de rollo y lote de fabricación. Además, ubicar donde se encuentran las soldaduras, refuerzos o reparaciones que se dieron durante la instalación.

Según la norma UNE 104424, para poder tener un control de calidad adecuado durante la soldadura de la impermeabilización se tiene que hacer los siguientes ensayos:

1. Para soldaduras de termofusión con canal central de comprobación se tienen que realizar dos ensayos. El primero es la comprobación de la estanqueidad del canal central de soldadura mediante la prueba de aire a presión según la norma UNE 104481-3-2, aceptando una pérdida de presión suministrada hasta del 10%. El 100% de las soldaduras que se realicen deben ser comprobadas a través de este método. En caso de que se produzcan uniones ortogonales de las membranas, y no haya como realizar el ensayo de aire a presión, se hará una comprobación mediante el uso de punta roma, el cual identificará puntos débiles o lugares donde no exista la suficiente adherencia. El segundo es el ensayo de la resistencia de la soldadura por desgarrado/pelado mediante tensiómetro de campo según la norma UNE 104304. La resistencia al desgarrado tiene que ser mayor o igual a 5.5N/mm y

se debe realizar el ensayo a un mínimo del 15% de las soldaduras en el caso de que los resultados sean positivos y si no se debe realizar al 100%.

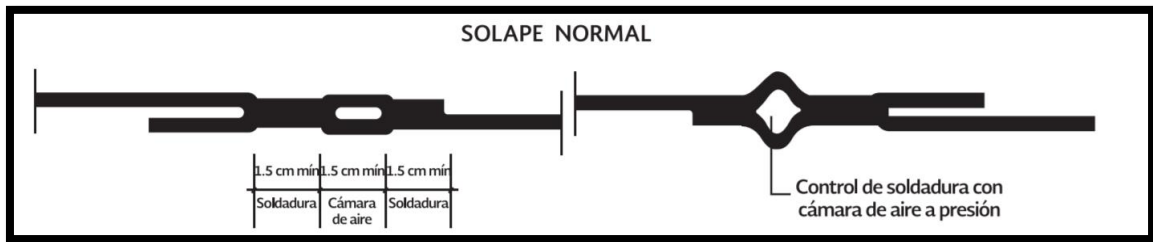


IMAGEN 3.5 – Solape con canal central

Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 41)

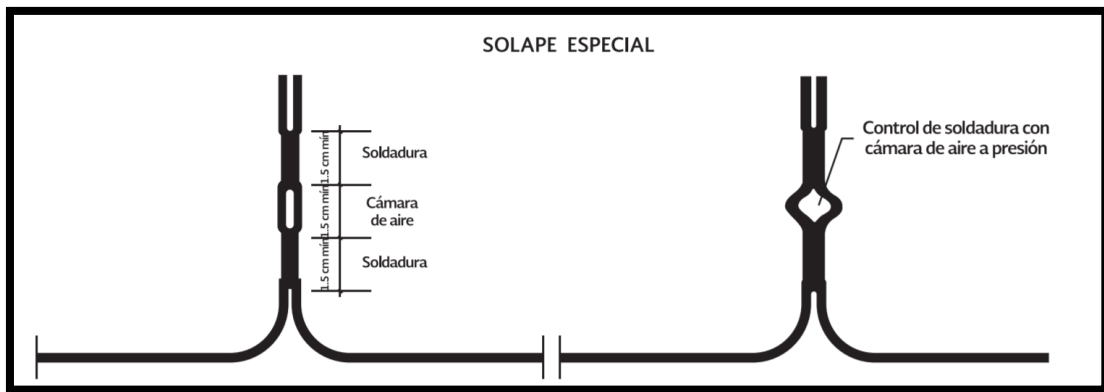


IMAGEN 3.6 – Solape especial con canal central

Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 41)

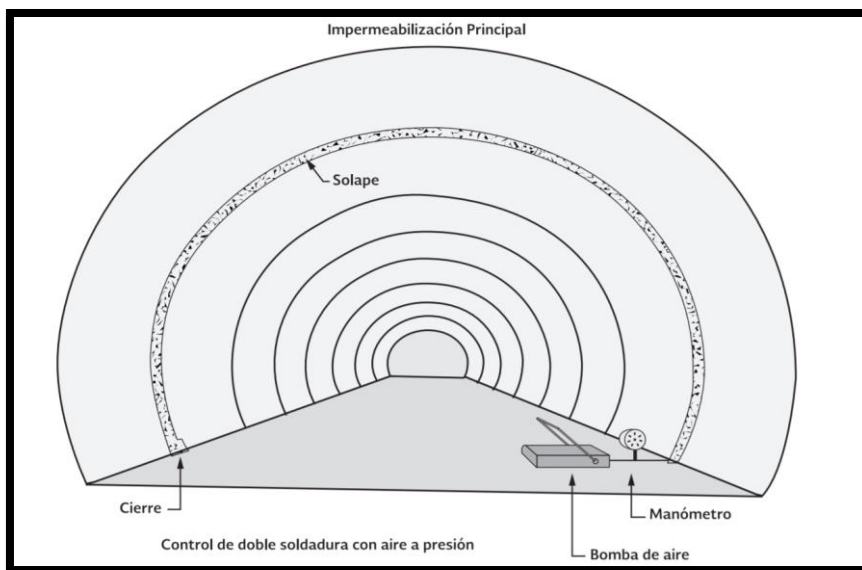


IMAGEN 3.7 – Control de soldadura

Fuente: (Asociación Española de Normalización y certificación , 2015, pág. 42)

2. Para soldaduras por aire caliente sin canal central de comprobación se debe hacer una inspección visual al 100% de la soldadura, realizando un ensayo mecánico en el cual se utiliza un punzón de punta roma. No se aceptan discontinuidades en la soldadura y la presencia de burbujas que representan la entrada de aire.

Luego de realizar los respectivos ensayos que garantizaran la correcta instalación del sistema de impermeabilización, se debe emitir un informe del control de calidad el cual incluirá como mínimo:

- Resultados de los ensayos realizados, así como las metodologías usadas.
- Croquis de despiece
- Trazabilidad de la geomembrana
- Dossier fotográfico

Disponibilidad en el Mercado

En el Ecuador existen empresas que se dedican a la fabricación o a la importación de geotextiles y geomembranas para diferentes usos en el sector de la construcción.

A continuación, nombraré algunas de las empresas en las cuales podemos encontrar los productos requeridos para poder realizar el sistema de impermeabilización que se propone en este trabajo:

- Pivaltec Geosintéticos S.A
- Ingeniería & Geosintéticos S.A.
- Geosolutions Synthetic S.A
- Corporación Industrial Andina S.A
- Geocco – Nextco
- TONICOMSA S.A

Cabe mencionar que para la utilización de los materiales que dispone cada empresa hay que realizar los respectivos ensayos o conocer los valores que están especificados en las tablas 4 y 5 para geotextiles y geomembranas respectivamente.

CAPITULO 4: Aplicación del sistema de impermeabilización en el Ecuador

Infraestructura de Túneles en el Ecuador

La construcción de túneles en el Ecuador se ha venido realizando más o menos desde los años 70 como efecto de querer mejorar la movilidad urbana e interprovincial entre las grandes ciudades del país, así como también se ha venido realizando como trabajos complementarios para el funcionamiento de centrales hidroeléctricas o también en proyectos ligados con sistemas de riego, desafiando la complicada geografía y geología que presenta el territorio ecuatoriano y la limitada tecnología y mano de obra que se poseía en esas épocas.

A continuación, se describirán algunos de los túneles más importantes que se han realizado en el país a lo largo de estos años

- **TUNELES DE SAN JUAN:** La ciudad de Quito en los años 70, durante la alcaldía del ex – presidente de la Republica Sixto Durán Ballén, se encontraba en un crecimiento inevitable y necesitaba una mejora en la movilidad urbana en el sentido norte- sur, por lo que se decidió realizar esta obra de gran magnitud al límite occidental de la ciudad bajo el barrio de San Juan, basándose en un principio en una tesis de grado del Ingeniero Bolívar Arteaga que tenia de título “Vialidad urbana en la Ciudad de Quito y el cálculo bajo los túneles de San Juan”. Este proyecto consiste en 3 túneles que se construyen sobre la Av. Mariscal Sucre, el de San Diego que posee una longitud de 64m, el de San Juan con una longitud de 706m y el de San Roque con 456m, los mismos que atraviesan terrenos de cangahua y piedra suelta. La duración de la construcción fue de 4 años y cobró la vida de varios obreros por derrumbes durante la excavación.



IMAGEN 4.1 – Túnel de San Juan

- **TÚNEL DE GUAYASAMÍN:** Se encuentra en la ciudad de Quito y cumple una gran función en la movilidad de la ciudad, conectándola con las diferentes vías perimetrales y los valles de Cumbayá, Tumbaco que se han poblado de manera exorbitante en los últimos años. El túnel tiene una longitud aproximada de 1300m, su sostenimiento se basa en el uso de marcos rígidos de acero colocados a 1,50m de distancia en toda su longitud y revestido de hormigón armado.



IMAGEN 4.2 – Túnel de Guayasamín

- **TÚNEL SAN EDUARDO:** Se encuentra ubicado en Guayaquil y es construida para mejorar la infraestructura vial y descongestionar el tráfico de la ciudad. Su construcción fue financiada por el Municipio de Guayaquil y el CAF (Corporación Andina de Fomento), consta de 7 tramos cada uno de ellos con aproximadamente 1295m de longitud y se sitúa como los túneles más largos del país.



IMAGEN 4.3 – Túnel San Eduardo

- **TÚNELES DEL CARMEN Y SANTA ANA:** Se encuentran ubicados en la ciudad de Guayaquil y consiste en dos tramos que atraviesan los cerros Santa Ana y El Carmen, el primero es de 644m y el segundo es 745m de longitud. Estas construcciones conectan la Av. Pedro Méndez con el Malecón Simón Bolívar.



IMAGEN 4.4 – Túnel Cerro El Carmen

- **TÚNEL DE CONDUCCIÓN, CENTRAL COCA CODO SINCLAIR:** La construcción de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair tomó lugar entre las provincias del Napo y Sucumbíos. Este proyecto emblemático generará una potencia de 1500 MW y será de gran ayuda para lograr un desarrollo sustentable del país. Parte de la construcción del proyecto fue la realización de un túnel de conducción de aproximadamente 24.83km de longitud y 8.20m de diámetro, éste conducirá el agua desde el embalse compensador a la casa de máquinas, donde a través de 8 turbinas Pelton se generará la potencia deseada. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2018)



IMAGEN 4.5 – Perforación del túnel de conducción en el Proyecto Coca – Codo Sinclair.

Fuente: <http://www.elcomercio.com/actualidad/perforacion-tunel-conduccion-cocacodosinclair.html>
.Napo, abril 2015

Elaborada por: Galo Paguay

- **TÚNEL DE CONDUCCIÓN, CENTRAL AGOYÁN-CENTRAL SAN FRANCISCO:** Se encuentra ubicado en la cordillera de los andes en la zona oriental, cerca de la vía Baños-Puyo. Es un túnel de conducción de agua de aproximadamente 12km de longitud y una sección de 7m de diámetro, éste transportará el agua utilizada en la central Agoyán a la casa de máquinas de la central San Francisco por una diferencia de nivel de cotas y servirá para la generación de energía eléctrica.



IMAGEN 4.6 – Excavación del Túnel de conducción Agoyán-San Francisco

Fuente: <https://www.eluniverso.com/2005/05/28/0001/12/F83163FDE651448B83BD09493CA07E4E.html>. Tungurahua, Mayo 2005.

Elaborada por: Jorge Peñafiel

- **TÚNEL DE TRASVASE SAN MARCOS:** Este túnel forma parte del Proyecto de Riego Tabacundo, el cual tiene una longitud de 700m y tiene la función de captar agua para contribuir la producción agraria y las condiciones de vida de las poblaciones de Cayambe y Pedro Moncayo.



IMAGEN 4.7 – Túnel trasvase San Marcos

Fuente: <http://www.pichincha.gob.ec/gestion/infraestructura-fisica/proyecto-de-riego-tabacundo.html>
Cayambe, Diciembre 2016

Elaborado por: Wilson Ushiña

- **TÚNEL CHISINCHE:** Es un proyecto complementario de la ampliación a 4 carriles de la vía Alóag- Sto. Domingo, el túnel tiene una longitud de 446m, 10,64m de ancho y una altura de 7,40m, el sostenimiento es a base de perfiles de acero y hormigón.



IMAGEN 4.8 – Túnel Chisinche.

Fuente: <http://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador-tunel-habilita-via-aloag.html> Pichincha, diciembre 2014.

Elaborado por: Bolívar Velasco

- **METRO DE QUITO:** Debido al crecimiento de la población y al crecimiento del parque automotor en la ciudad de Quito, se ha generado una congestión vehicular que es necesario solucionar. Por esta razón, el Municipio de Quito realiza esta construcción como una estrategia que va a “permitir la movilización ágil y oportuna de los quiteños a través de un sistema integrado que lo articula el Metro de Quito” (Municipio de Quito, 2018). Este proyecto consiste en un trazado de 22 km aproximadamente con un diámetro de 9,4m que es la sección transversal de las tuneladoras que son usadas.



IMAGEN 4.9 – Metro de Quito

Fuente: <http://www.construccion-pa.com/noticias/metro-quito-ya-se-invertido-unos-283-millones/>. Quito, Julio 2017.

Elaborada por: mccopa

Como hemos visto existe una gran variedad de túneles en el Ecuador, ya sea vial o líneas de conducción de agua con diferentes propósitos.

Se ha descrito con brevedad y se ha señalado aspectos básicos de cada uno de ellos ya que no existe información disponible de la infraestructura actual de túneles en el Ecuador y si hay la proyección de la realización de más, entonces no se sabe con claridad cuantos túneles existen en el territorio y como fueron realizados por lo que no podemos conocer el sistema constructivo que se utilizó y si consta con un sistema de impermeabilización o no.

Con el propósito de proponer la utilización de membrana PVC para la impermeabilización de túneles se ha seleccionado el túnel que existe en la vía Pintag - Tolontag, el cual solo se encuentra realizado la excavación, sin ningún tipo de sistema de sostenimiento ni sistema de impermeabilización.

Túnel vía Tolontag – Pintag.

Generalidades

- **Ubicación del túnel**

El túnel se encuentra geográficamente en la Parroquia de Pintag, cantón Quito, sector del Valle de los Chillos, provincia de Pichincha.

El túnel se encuentra en las siguientes coordenadas:

ACCESO → Latitud $0^{\circ} 21' 59,17''$ S
Longitud $78^{\circ} 22' 7,44''$ O

FIN → Latitud $0^{\circ} 21' 59,22''$ S
Longitud $78^{\circ} 22' 3,93''$ O



IMAGEN 4.10 – Ubicación de Pintag.
Fuente: Google Earth



IMAGEN 4.11 – Trazado del Túnel.
Fuente: Google Earth

- **Climatología de la zona**

El INAMHI, el cual es el encargado del estudio meteorológico e hidrológico del país, carece de datos actualizados de la Estación Meteorológica Pintag, no se han presentado datos en los últimos 10 años. Por lo tanto, el gobierno de Pichincha en su *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la Parroquia de Píntag* toma como referencia los datos del Municipio del Cantón Rumiñahui para Pintag (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Píntag, 2012) e indica lo siguiente:

- Temperatura media: 13,74 °C
- Temperatura mínima 8 °C
- Temperatura máxima: 20 °C

No existe información de la pluviosidad del sector, por lo que se realizó una estimación tomando en cuenta 3 estaciones pluviométricas cercanas a la zona.

- IZOBAMBA
- UYUMBICHO
- RUMIPAMBA - PICHINCHA

Los cálculos respectivos se encuentran en los anexos, de los cuales se obtuvieron los siguientes datos:

PRECIPITACION (mm)																
PUNTO	COTA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGT.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.	SUMA	PROMEDIO	
1	2820	160	180	206	195,6	145,6	62,6	32,5	34,9	73,2	128	144	154	1516,4	126,3667	
2	2840	164	187	213	196,8	144	62,8	32,68	35,8	72,3	132	148	160	1548,38	129,0317	

TABLA 6 – Precipitación media mensual

- **Hidrología de la zona**

Existe la presencia de varios cuerpos hídricos en la zona, los cuales son usados por la población para diversos fines.

- **Geología de la zona**

Al ser un sector que está ubicado en las faldas de los volcanes Antisana y Sincholagua, la zona está conformada por sedimentos de origen volcánico, en donde predominan lavas indiferenciadas y piroclastos. Los sedimentos son generalmente arenas de grano medio a fino y limos de baja a nula plasticidad. Estos suelos forman parte de la formación cangahua, la cual es producto de la caída de cenizas volcánicas.

No existen señales de inestabilidad global del terreno. Los niveles freáticos no se encuentran a profundidades superficiales en el sector por lo que el único medio que aporta a la infiltración de agua al túnel es el agua que se infiltra de la lluvia.



IMAGEN 4.12 – Túnel vía Tolontag – Píntag

- **Dimensiones y datos del túnel**

- **Longitud:** 118m
- **Ancho:** 3,70m
- **Altura:** 5,20m
- **Cota:** 2800msnm
- **Tipo de excavación:** Excavación en suelo
- **Sistema de impermeabilización:** No posee.
- **Sistema de sostenimiento:** No posee.

Estudio de Suelos

Braja Das en su libro *Principios de la Ingeniería de la fundación* define al suelo como “el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica en descomposición junto con el líquido y el gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas.” (Das, 2014)

El suelo se usa como material en la construcción de varias obras ingenieriles, y también forma parte de ellas al soportarlas, ya que toda construcción se asienta sobre el suelo o se construye debajo de él. Por esto, es muy importante conocer las propiedades del suelo, su origen, su distribución de tamaño de grano, su capacidad de compresión, su capacidad portante, su resistencia al corte, y lo que nos centraremos ahora, su capacidad de permitir el paso de agua.

Las propiedades del suelo como la granulometría, los límites de Atterberg, la permeabilidad, entre otros, se pueden determinar mediante ensayos de laboratorio o ensayos in-situ, los cuales ya se encuentran estandarizados y normados por instituciones reconocidas. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, no todos los parámetros del suelo que se necesitan son determinados, ya sea por situaciones económicas u otras razones. En estos casos, el ingeniero tiene que realizar ciertas suposiciones con respecto a las propiedades del suelo.

Para tener una certeza de que los parámetros del suelo están bien determinados, ya sea que se hayan obtenido mediante ensayos de laboratorio y en campo, o simplemente fueron asumidos por correlaciones, el ingeniero debe conocer y comprender los principios básicos de la mecánica de suelos. Así mismo, la persona encargada de los estudios del suelo debe saber que los depósitos naturales de suelo en donde las estructuras son construidas no son homogéneos en la mayoría de los casos, por esto, se debe tener un conocimiento pleno de la geología, hidrogeología y geomorfología del área.

En este trabajo se necesita conocer la cantidad de agua que se infiltra en el suelo para poder determinar si las filtraciones existentes dentro del túnel son o no permitidas según la norma de impermeabilización para el diseño de túneles y galerías UNE 104424, y si se necesita realizar un sistema que garantice la estanqueidad del mismo. Para esto, es necesario determinar las relaciones fundamentales del suelo como es su gravedad específica, su porosidad, su relación de vacíos y determinar qué tipo de suelo es mediante la clasificación de suelos SUCS en diferentes puntos a lo largo del túnel para poder relacionarlos entre sí y conocer si el suelo que se encuentra por encima del túnel es más o menos homogéneo y poder generalizar la permeabilidad del mismo.

Para efectos de los estudios de suelo que deseo realizar, se extrajo 2 muestras inalteradas de dos puntos significativos encima del túnel. La primera a una profundidad de 11m y la segunda a 27m medidas desde la parte más alta del terreno que se encuentra arriba del túnel.

CLASIFICACION SUCS

Para poder determinar el tipo de suelo que se encuentra por encima del túnel, se ha utilizado el sistema unificado de clasificación de suelos(SUCS), el cual caracteriza el suelo por su granulometría y su plasticidad. A continuación, se presenta el respectivo procedimiento para poder realizar la clasificación de manera adecuada.

- Se determina el contenido de humedad de las muestras.
- Se realiza los respectivos ensayos para poder determinar el limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad.
- Se realiza un análisis granulométrico de la muestra.

• Contenido de Humedad

$$w = \frac{\text{suelo humedo} - \text{suelo seco}}{\text{suelo seco}} * 100$$

- Muestra #1

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
E22	18,5	48,29	39,37	42,741
A1	18,56	47,91	39,02	43,451
				43,096

- Muestra #2

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
P33	17,82	45,89	38,21	37,666
P563	17,52	43,42	36,42	37,037
				37,351

CONTENIDO DE HUMEDAD PROMEDIO (%)	40,2235
-----------------------------------	---------

- **Limite plástico(LP)**

Atterberg lo define como el punto en el que se encuentra el suelo entre el estado plástico y el estado semisólido.

El ensayo consiste en realizar rollitos del material que se ensaya de un diámetro aproximado de 3mm, el contenido de agua que contenga el rollito antes del momento que se produzca un agrietamiento o desmoronamiento es cuando ha alcanzado su límite plástico.



IMAGEN 4.13– Muestras para limite plástico

- **Muestra #1**

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
12E	9,44	14,28	12,98	36,723
62Z	6,14	11,2	9,86	36,022

El limite plástico es el promedio del contenido de humedad de las dos muestras

$$LP1 = \frac{36,723+36,022}{2}$$

$$LP1 = 36,372$$

- **Muestra #2**

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
S28	6,86	11,7	10,46	34,444
73Z	6,1	11,73	10,28	34,689

El limite plástico es el promedio del contenido de humedad de las dos muestras

$$LP1 = \frac{34,444+34,689}{2}$$

$$LP2 = 34,567$$

- **Limite líquido(LL)**

Atterberg lo define como el punto en que se encuentra el suelo entre los estados semilíquido y plástico.

El método consiste en preparar suelo remoldado con material pasante el tamiz N°40 alrededor de 150 a 200gr y mezclar con agua destilada esperando que en el ensayo se produzca alrededor de 25 golpes antes de que se una los bordes de la ranura. Existen dos métodos para sacar el limite liquido

- **Método A:** también llamado método multipunto, donde se tiene que conseguir 3 puntos. Uno entre 25 a 35, otro entre 20 a 30 y otro de 15 a 25. Se determina el

contenido de humedad de cada uno y se realiza una gráfica contenido de humedad vs número de golpes y se estima el contenido de humedad en 25 golpes.

- **Método B:** También llamado método de un punto. Este lo debe realizar un trabajador experimentado ya que requiere de mucho criterio para estimar el límite líquido.

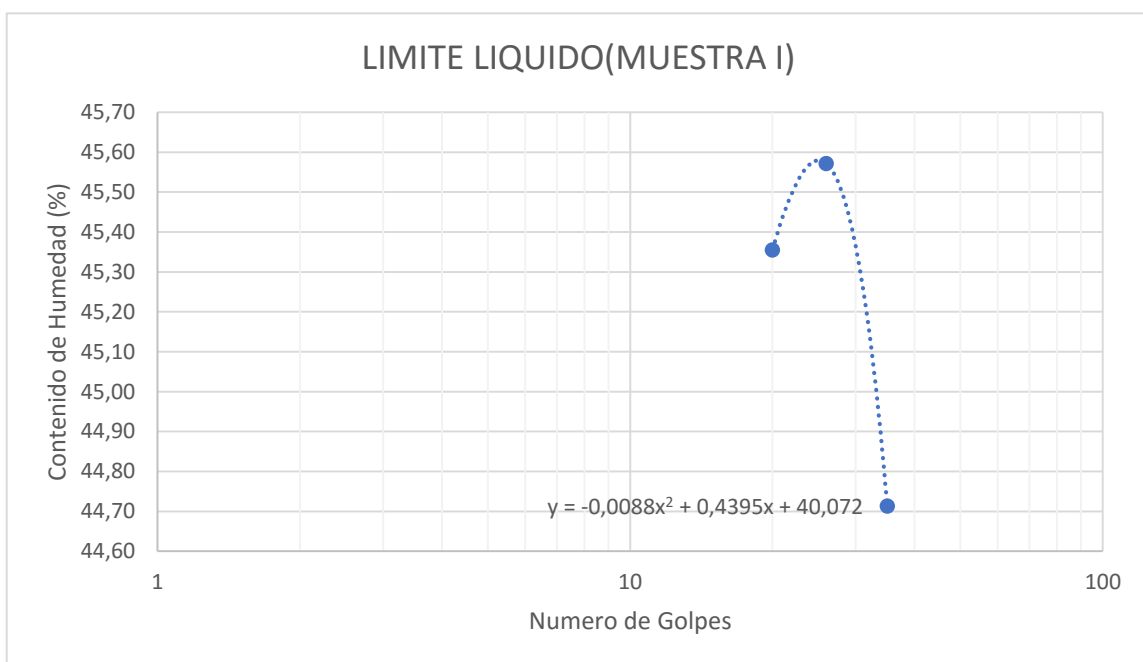


IMAGEN 4.14 – Muestras para límite líquido

En esta ocasión realizaremos el Método A.

Muestra #1

N° de Golpes	N° de Cápsula	Peso Cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
26	H1	9,03	24,81	19,87	45,57
35	Z34	6,35	27,29	20,82	44,71
20	79Z	6,15	24,77	18,96	45,36



Calculo del límite líquido:

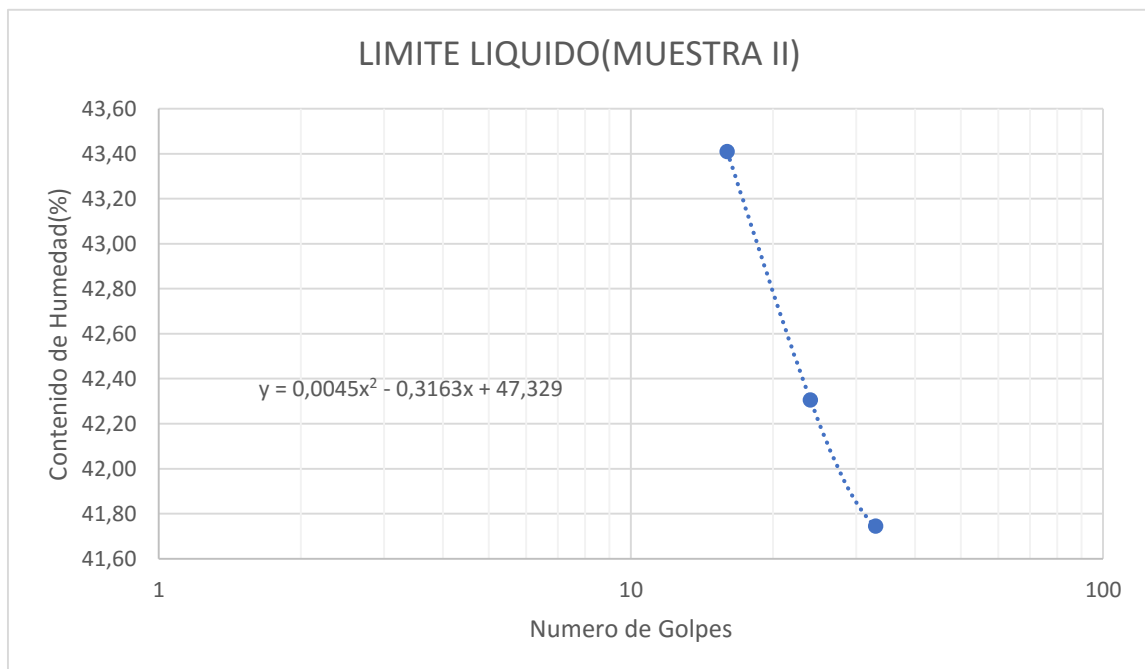
$$LL1 = -0,0088X^2 + 0,4395X + 40,072$$

$$LL1 = -0,0088(25)^2 + 0,4395(25) + 40,072$$

$$LL1 = 45,56$$

Muestra #2

N° de Golpes	N° de Cápsula	Peso Cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
33	65Z	5,86	25,52	19,73	41,74
24	72S	6,34	26,96	20,83	42,31
16	1Z	5,98	26,76	20,47	43,41



Calculo del límite líquido:

$$LL2 = 0,0045X^2 - 0,3163X + 47,329$$

$$LL2 = 0,0045(25)^2 - 0,3163(25) + 47,329$$

$$LL2 = 42,234$$

- **Índice plástico**

Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

- **Muestra #1**

$$IP1 = LL2 - LP2$$

$$IP1 = 45,56 - 36,37$$

$$IP1 = 9,19$$

- **Muestra #2**

$$IP2 = LL3 - LP3$$

$$IP2 = 42,23 - 34,57$$

$$IP2 = 7,66$$

- **Análisis Granulométrico**

Todos los suelos tienen una gran variedad de tamaño de grano en su composición y para poder clasificarlo se necesita saber su distribución de tamaños por lo que es necesario realizar un análisis granulométrico, el cual consisten tomar una cantidad de suelo seco, bien pulverizada y pasarla a través de una serie de tamices en orden descendente con un plato al fondo que no permita que se pierda material.

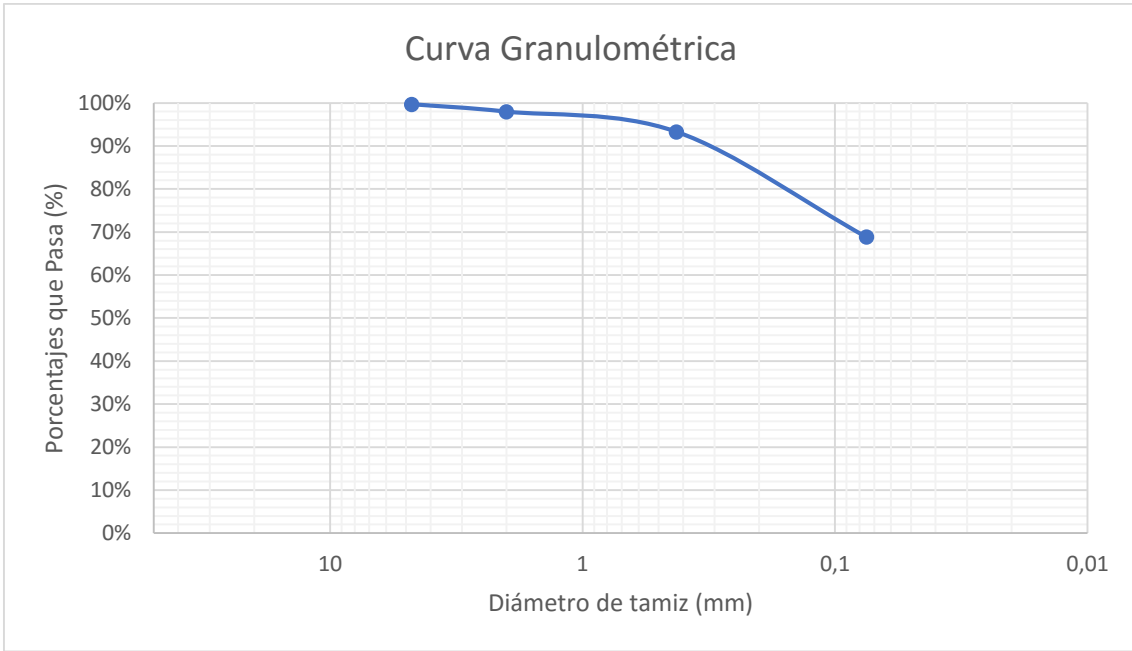
La cantidad de masa retenida en cada tamiz es medida y se determina el porcentaje que pasa. Luego se realiza la curva granulométrica.

A continuación, se presenta el análisis granulométrico de cada muestra de suelo:

- **Muestra #1**

Suelo seco(gr)	64,2
----------------	------

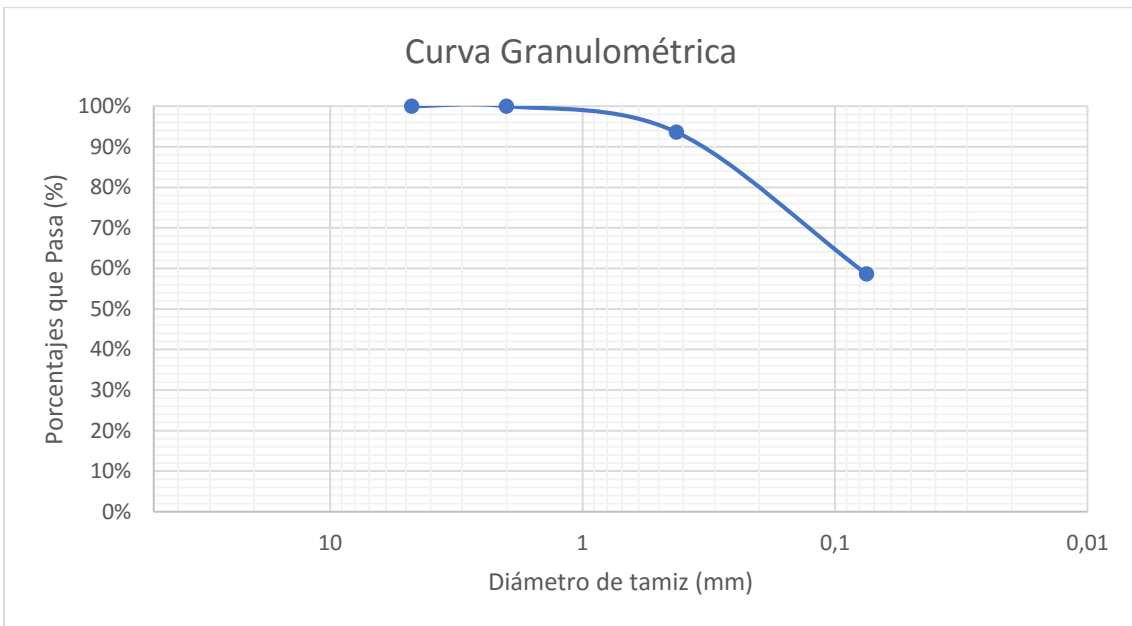
Tamiz	Abertura (mm)	Masa Retenida (gr)	Masa Retenida (%)	Masa Ret. Acum (%)	Masa Pasa (%)
N°4	4,75	0,2	0,31153	0,31153	99,7
N°10	2	1,1	1,71340	2,02492	98,0
N°40	0,425	3	4,67290	6,69782	93,3
N°200	0,075	15,7	24,45483	31,15265	68,8



Muestra #2

Suelo seco(gr)	57,8
----------------	------

Tamiz	Abertura (mm)	Masa Retenida (gr)	Masa Retenida (%)	Masa Ret. Acum (%)	Masa Pasa (%)
N°4	4,75	0	0,00000	0,00000	100,00000
N°10	2	0	0,00000	0,00000	100,00000
N°40	0,425	3,7	6,40138	6,40138	93,59862
N°200	0,075	20,2	34,94810	41,34948	58,65052



Ya teniendo todos los datos de granulometría y de plasticidad procedemos a realizar la clasificación. De acuerdo con la siguiente tabla:

Divisiones Mayores		Símbolo de Grupo	Nombres Típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares		
Suelos de grano grueso Si menos del 50% del material pasa el tamiz No. 200	Gravas Si menos del 50% de la fricción gruesa pasa por el tamiz No. 4)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}^2/D_{10} \times D_{60} < 3$		
		GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW		
	Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $IP < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < IP < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo	
		GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcillosas	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $IP > 7$		
	Arenas (Si más del 50% de la fricción gruesa pasa por el tamiz No. 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}^2/D_{10} \times D_{60} < 3$	
			SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW	
Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)		SM	Arenas limosas, mezclas arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $IP < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 \leq IP \leq 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo	
		SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $IP > 7$		
Suelos de grano fino Si más del 50% del material pasa el tamiz No. 200	Limos y arcillas (Límite Líquido $LL < 50$)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad	1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. 2. Dependiendo del porcentaje de finos (fracción menor que el tamiz No. 200 los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% --- GW, GP, SW, SP Más del 12% --- GM, GC, SM, SC De 5 a 12% --- Casos de frontera que requieren doble símbolo		
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras			
		OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad			
	Limos y arcillas (Límite Líquido $LL > 50$)	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos			
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas			
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos			
	Suelos altamente orgánicos	Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos			

TABLA 7 – Sistema unificado de clasificación de suelos SUCS

TABLAS DE RESULTADOS

- Muestra #1

TABLA DE RESUMEN	
CONTENIDO DE HUMEDAD(%)	43,096
LIMITE PLÁSTICO	36,372
LIMITE LÍQUIDO	45,56
INDICE PLÁSTICO	9,19
Retenido Tamiz N°200(%)	31,15
Pasa Tamiz N°4 (%)	99,7

Considerando los datos obtenidos mediante los ensayos de laboratorio y comparando con la TABLA 7 he determinado que el suelo es un limo arenoso, húmedo, con grumos endurecidos del mismo material

ML: Limos inorgánicos y arenas muy finas

- Muestra #2

TABLA DE RESUMEN	
CONTENIDO DE HUMEDAD(%)	37,351
LIMITE PLÁSTICO	34,567
LIMITE LÍQUIDO	42,234
INDICE PLÁSTICO	7,66
Retenido Tamiz N°200(%)	41,35
Pasa Tamiz N°4 (%)	100

Considerando los datos obtenidos mediante los ensayos de laboratorio y comparando con la TABLA 7 he determinado que el suelo es un Limo arenoso, húmedo, con piedra pómez

ML: Limos inorgánicos y arenas muy finas

RELACIONES FUNDAMENTALES

- **Gravedad Específica**

Para calcular la gravedad específica del suelo se utilizó el “método de prueba estándar para Gravedad Específica de los suelos mediante el uso del picnómetro de agua”, el cual está bajo la jurisdicción del comité D18 de ASTM.

Este método sirve para determinar el Gs del material pasante el tamiz N°4 mediante el uso de un picnómetro.

Se lo puede realizar por dos métodos, su elección depende de la autoridad competente:

- **Método A:** Se realiza con una muestra húmeda. Este método es recomendable ya que, al extraer el aire atrapado en la mezcla del suelo y agua, puede existir inconvenientes y se puede salir material del picnómetro, afectando la masa total que se encontraba en un principio.
- **Método B:** Se realiza con una muestra seca al horno. Es aceptable, pero requiere de mayor cuidado al momento de extraer los vacíos.

La gravedad específica del suelo se define como una relación entre la masa de una unidad de volumen de un suelo y la masa del mismo volumen de agua libre de aire a 20°C. Este parámetro del suelo es usado para poder conocer la relación entre las fases del suelo como el grado de saturación del suelo, la relación de vacíos, la porosidad del suelo, y también para calcular la densidad del suelo.

MATERIALES

Para poder realizar este ensayo de laboratorio se necesita los siguientes aparatos, reactivos y especímenes de prueba:

- **Espécimen de prueba:** Una muestra de suelo, ya sea húmeda o seca al horno que sea representativa de la muestra y pasante del tamiz N°4.
- **Reactivo:** Debe ser agua destilada.
- **Picnómetro:** puede ser un matraz con tapón, un matraz de yodo o un matraz aforado con capacidad mínima de 250ml. Su volumen tiene que ser de 2 a 3 veces mayor que la mezcla agua-suelo que se obtenga.
- **Balanza:** Tiene que tener una precisión de hasta 0,01 gr.
- **Horno de Secado:** Tiene que ser capaz de mantener una temperatura constante de 110±5°C.
- **Termómetro:** Debe tener una precisión de 0,1°C y se permite un error de 0,5°C.
- **Aparato removedor de aire atrapado:** Hay como usar un mechero de Bunsen que pueda mantener una temperatura adecuada para hervir agua, o un sistema de

aspirado capaz de producir una presión negativa de 100mm de mercurio o una menor presión absoluta.

- **Contenedor aislado:** Tiene que mantener la temperatura controlada.
- **Embudo:** Debe tener una superficie plana, suave, no corrosiva. La cola del embudo debe sobrepasar la marca de calibración del matraz y el diámetro de entrada debe ser lo suficientemente grande para que el material entre con facilidad
- **Tamiz N°4:** El mismo que se utiliza para realizar el ensayo de granulometría.
- **Licuada:** Cualquiera que permita realizar una buena mezcla de suelo-agua.

Antes de poder realizar en ensayo, se debe realizar la calibración del picnómetro el cual se especifica en esta normativa ASTM D254-14.

PROCEDIMIENTO

En esta ocasión se ha realizado el método B con una muestra seca al horno.

- Obtener la masa del picnómetro.
- Secar aproximadamente 120gr de suelo en el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Pulverizar los grumos que existen en el suelo seco mediante un material que no haga perder ni un gramo del suelo seco.
- Colocar el suelo en la licuadora y añadir una cantidad aproximada de agua de $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{2}$ de la altura del picnómetro y proceder a mezclar hasta que tenga una buena consistencia.
- Colocar el embudo sobre el picnómetro y verter la mezcla, teniendo la precaución de no perder ni un gramo de la mezcla suelo-agua.
- Dentro del picnómetro hay que remover el aire atrapado en la mezcla mediante el uso del aparato removedor de aire. Es recomendable agitar el picnómetro continuamente al menos 2 horas para que salga todo el aire.
- Ya cuando se haya extraído todo el aire atrapado, hay que llenar el picnómetro con agua sin aire atrapado hasta la marca de calibración.
- Luego colocar el picnómetro en el contenedor aislado junto con el termómetro para lograr un equilibrio termal.
- Después secar la superficie exterior y medir la masa del picnómetro, agua y suelo mediante el uso de la balanza.
- Medir la temperatura de la mezcla suelo-agua.
- Realizar los cálculos respectivos

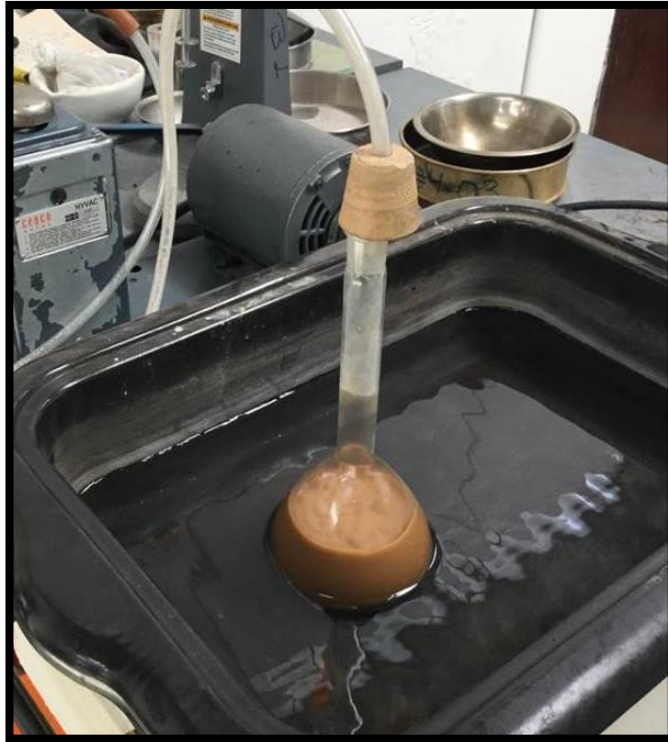


IMAGEN 4.15 – Extracción de aire atrapado

DATOS

Picnómetro (gr)	Volumen Picnómetro (mL)	Peso del Picnómetro + agua (gr)	Temperatura de Prueba (°C)
149,91	500	648,45	23,7

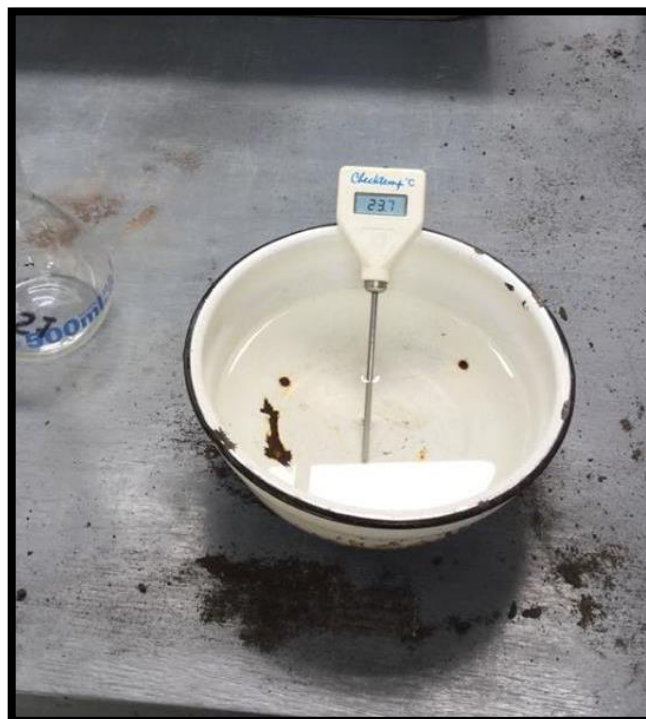


IMAGEN 4.16 – Temperatura de Prueba

- **Muestra #1**

Profundidad = 11m

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
H16	36,68	174,77	137,66	36,75

De los 137,66gr de suelo seco que se obtuvieron se colocó 55,67gr en el picnómetro.

Masa suelo seco (gr)	Masa de Picnómetro, Suelo, Agua (gr)	Temperatura de Prueba (°C)
55,67	680,59	23,7

- **Muestra #2**

Profundidad= 27m

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
H13	32,96	155,02	123,33	35,07

De los 123.33gr de suelo seco que se obtuvieron se colocó 54,30gr en el picnómetro.

Masa suelo seco (gr)	Masa de Picnómetro, Suelo, Agua (gr)	Temperatura de Prueba (°C)
54,3	680,19	23,7

De la tabla 8 sacada de la norma ASTM D254-14 se obtiene Densidad del Agua y el coeficiente de temperatura:

Temperature (°C)	Density (g/mL) ^C	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^C	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^C	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^C	Temperature Coefficient (K)
15.0	0.99910	1.00090	16.0	0.99895	1.00074	17.0	0.99878	1.00057	18.0	0.99860	1.00039
.1	0.99909	1.00088	.1	0.99893	1.00072	.1	0.99876	1.00055	.1	0.99858	1.00037
.2	0.99907	1.00087	.2	0.99891	1.00071	.2	0.99874	1.00054	.2	0.99856	1.00035
.3	0.99906	1.00085	.3	0.99890	1.00069	.3	0.99872	1.00052	.3	0.99854	1.00034
.4	0.99904	1.00084	.4	0.99888	1.00067	.4	0.99871	1.00050	.4	0.99852	1.00032
.5	0.99902	1.00082	.5	0.99886	1.00066	.5	0.99869	1.00048	.5	0.99850	1.00030
.6	0.99901	1.00080	.6	0.99885	1.00064	.6	0.99867	1.00047	.6	0.99848	1.00028
.7	0.99899	1.00079	.7	0.99883	1.00062	.7	0.99865	1.00045	.7	0.99847	1.00026
.8	0.99898	1.00077	.8	0.99881	1.00061	.8	0.99863	1.00043	.8	0.99845	1.00024
.9	0.99896	1.00076	.9	0.99879	1.00059	.9	0.99862	1.00041	.9	0.99843	1.00022
19.0	0.99841	1.00020	20.0	0.99821	1.00000	21.0	0.99799	0.99979	22.0	0.99777	0.99957
.1	0.99839	1.00018	.1	0.99819	0.99998	.1	0.99797	0.99977	.1	0.99775	0.99955
.2	0.99837	1.00016	.2	0.99816	0.99996	.2	0.99795	0.99974	.2	0.99773	0.99952
.3	0.99835	1.00014	.3	0.99814	0.99994	.3	0.99793	0.99972	.3	0.99771	0.99950
.4	0.99833	1.00012	.4	0.99812	0.99992	.4	0.99791	0.99970	.4	0.99768	0.99947
.5	0.99831	1.00010	.5	0.99810	0.99990	.5	0.99789	0.99968	.5	0.99766	0.99945
.6	0.99829	1.00008	.6	0.99808	0.99987	.6	0.99786	0.99966	.6	0.99764	0.99943
.7	0.99827	1.00006	.7	0.99806	0.99985	.7	0.99784	0.99963	.7	0.99761	0.99940
.8	0.99825	1.00004	.8	0.99804	0.99983	.8	0.99782	0.99961	.8	0.99759	0.99938
.9	0.99823	1.00002	.9	0.99802	0.99981	.9	0.99780	0.99959	.9	0.99756	0.99936
23.0	0.99754	0.99933	24.0	0.99730	0.99909	25.0	0.99705	0.99884	26.0	0.99679	0.99858
.1	0.99752	0.99931	.1	0.99727	0.99907	.1	0.99702	0.99881	.1	0.99676	0.99855
.2	0.99749	0.99929	.2	0.99725	0.99904	.2	0.99700	0.99879	.2	0.99673	0.99852
.3	0.99747	0.99926	.3	0.99723	0.99902	.3	0.99697	0.99876	.3	0.99671	0.99850
.4	0.99745	0.99924	.4	0.99720	0.99899	.4	0.99694	0.99874	.4	0.99668	0.99847
.5	0.99742	0.99921	.5	0.99717	0.99897	.5	0.99692	0.99871	.5	0.99665	0.99844
.6	0.99740	0.99919	.6	0.99715	0.99894	.6	0.99689	0.99868	.6	0.99663	0.99842
.7	0.99737	0.99917	.7	0.99712	0.99892	.7	0.99687	0.99866	.7	0.99660	0.99839
.8	0.99735	0.99914	.8	0.99710	0.99889	.8	0.99684	0.99863	.8	0.99657	0.99836
.9	0.99732	0.99912	.9	0.99707	0.99887	.9	0.99681	0.99860	.9	0.99654	0.99833
27.0	0.99652	0.99831	28.0	0.99624	0.99803	29.0	0.99595	0.99774	30.0	0.99565	0.99744
.1	0.99649	0.99828	.1	0.99621	0.99800	.1	0.99592	0.99771	.1	0.99562	0.99741
.2	0.99646	0.99825	.2	0.99618	0.99797	.2	0.99589	0.99768	.2	0.99559	0.99738
.3	0.99643	0.99822	.3	0.99615	0.99794	.3	0.99586	0.99765	.3	0.99556	0.99735
.4	0.99641	0.99820	.4	0.99612	0.99791	.4	0.99583	0.99762	.4	0.99553	0.99732
.5	0.99638	0.99817	.5	0.99609	0.99788	.5	0.99580	0.99759	.5	0.99550	0.99729
.6	0.99635	0.99814	.6	0.99607	0.99785	.6	0.99577	0.99756	.6	0.99547	0.99726
.7	0.99632	0.99811	.7	0.99604	0.99783	.7	0.99574	0.99753	.7	0.99544	0.99723
.8	0.99629	0.99808	.8	0.99601	0.99780	.8	0.99571	0.99750	.8	0.99541	0.99720
.9	0.99627	0.99806	.9	0.99598	0.99777	.9	0.99568	0.99747	.9	0.99538	0.99716

TABLA 8 – Densidad del agua y coeficiente de temperatura para varias temperaturas
Fuente: (American Society for Testing and Materials, 2014)

Temperatura de Prueba (°C)	Densidad del agua (g/mL)	Coficiente de Temperatura (K)
23,7	0,99737	0,99917

CÁLCULOS

- Hay que calcular la masa del picnómetro y agua a la temperatura de prueba

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p * \rho_{w,t})$$

Donde:

$M_{pw,t}$ = Masa del picnómetro y agua a la temperatura de prueba

M_p = El promedio de la masa calibrada del picnómetro.

V_p = El promedio calibrado del volumen del picnómetro.

$\rho_{w,t}$ = Densidad del Agua en la temperatura de prueba.

$$M_{pw,t} = 149,91 + (500 * 0,99737)$$

$$M_{pw,t} = 648,595$$

- Ahora se debe calcular la gravedad específica del suelo a la temperatura de prueba.

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{(M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s))}$$

Donde:

ρ_s = densidad del suelo (g/cm^3)

$\rho_{w,t}$ = densidad del agua a temperatura de prueba (g/cm^3)

M_s = Masa del suelo seco (gr)

$M_{pws,t}$ = Masa del picnómetro, agua, suelo a temperatura de prueba (gr)

- **Muestra #1**

$$G_t = \frac{55,67}{(648,595 - (680,59 - 55,67))}$$

$$G_t = 2,35$$

- **Muestra #2**

$$G_t = \frac{54,30}{(648,595 - (680,19 - 54,30))}$$

$$G_t = 2,39$$

- Se calcula la Gravedad Específica del suelo a 20°C

$$G_{20^\circ\text{C}} = K * G_t$$

- **Muestra #1**

$$G_{20^\circ\text{C}} = 0,99917 * 2,35$$

$$G_{20^\circ\text{C}} = 2,348$$

- **Muestra #2**

$$G_{20^{\circ}\text{C}} = 0,99917 * 2,39$$

$$G_{20^{\circ}\text{C}} = 2,388$$

• **Densidad del Suelo**

Para calcular la Densidad del Suelo se utilizó el “Método de prueba estándar para la determinación de laboratorio de la densidad de muestras de suelo”, el cual fue elaborado en las normas ASTM.

Dentro de la norma se establecen dos métodos para determinar la densidad o densidad bulk del suelo:

- **Método A:** se calcula el volumen recubriendo la muestra con cera o parafina y se determina el volumen desplazado en un contenedor con agua.
- **Método B:** en este, se determina directamente tomando las dimensiones de la muestra.

MATERIALES

- **Balanza:** tenga una precisión de 0,01gr, y que sea capaz de pesar muestras sumergidas en el agua.
- **Horno:** Capaz de mantener una temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- **Parafina**
- **Estufa**
- **Muestra inalterada de suelo**
- **Termómetro:** Debe tener una precisión de $0,1^{\circ}\text{C}$ y se permite un error de $0,5^{\circ}\text{C}$.

PROCEDIMIENTO

- Se prepara una muestra de 5x5cm aproximadamente de la muestra inalterada(calicata) del suelo ya extraída anteriormente del lugar de estudio.
- Se toma una muestra representativa de donde se extrajo el espécimen de 5x5cm para determinar el contenido de humedad.
- Se toma el peso de la muestra.

- Se recubre la muestra con parafina, la cual tiene una densidad conocida, para evitar que exista infiltración de agua al momento de tomar el peso sumergido de la muestra.
- Se toma el peso de la muestra con parafina
- Se toma el peso sumergido de la muestra con parafina



IMAGEN 4.17 – Extracción de la muestra de 5x5cm

DATOS

- **Muestra #1**

Profundidad = 11m

Para determinar contenido de humedad

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)
PS32	17,12	35,2
A15	18,65	34,97

Para determinar la densidad aparente

Solo Suelo (gr)	Suelo con Parafina (gr)	Peso Sumergido (gr)
219,4	229,84	81,68

Densidad Parafina (gr/cm3)	Densidad Agua a 23°C (gr/cm3)
0,89	0,99754

- **Muestra #2**

Profundidad= 27m

Para determinar contenido de humedad

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)
PS72	17,52	33,27
8Z	17,81	30,66

Para determinar la densidad aparente

Solo Suelo (gr)	Suelo con Parafina (gr)	Peso Sumergido (gr)
233,58	244,96	79,35

Densidad Parafina (gr/cm3)	Densidad Agua a 23°C (gr/cm3)
0,89	0,99754

CÁLCULOS

Determinar el contenido de humedad

- **Muestra #1**

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
PS72	17,52	33,27	28,96	37,675
8Z	17,81	30,66	27,06	38,919
				38,297

- **Muestra #2**

N° de Cápsula	Peso cápsula (gr)	Peso cápsula + Suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + Suelo seco(gr)	Contenido de Humedad(%)
PS32	17,12	35,2	30,37	36,453
A15	18,65	34,97	30,58	36,798
				36,625

Se determina la densidad total del suelo

$$\rho_t = \frac{M_t}{\frac{M_c - M_{sum}}{\rho_{agua}} - \frac{M_c - M_t}{\rho_{parafina}}}$$

Siendo:

ρ_t = Densidad total de la muestra (gr/cm³)

M_t = Masa húmeda de la muestra (gr)

M_c = Masa recubierta con parafina (gr)

M_{sum} = Masa sumergida de la muestra con parafina (gr)

$\rho_{parafina}$ = Densidad de la parafina (gr/cm³)

ρ_{agua} = Densidad del agua a temperatura de prueba (gr/cm³)

- **Muestra #1**

$$\rho_t = \frac{233,58}{\frac{244,96 - 79,35}{0,99754} - \frac{244,96 - 233,58}{0,89}}$$

$$\rho_t = 1,5244 \text{ gr/cm}^3$$

- **Muestra #2**

$$\rho_t = \frac{219,40}{\frac{229,84 - 81,68}{0,99754} - \frac{229,84 - 219,40}{0,89}}$$

$$\rho_t = 1,6039 \text{ gr/cm}^3$$

Se determina la densidad seca del suelo

$$\rho_s = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

ρ_s = Densidad seca del suelo (gr/cm³)

w = Contenido de agua de la muestra

ρ_t = Densidad total del suelo (gr/cm³)

- **Muestra #1**

$$\rho_s = \frac{1,5244}{1 + \frac{38,297}{100}}$$

$$\rho_s = 1,1023 \text{ gr/cm}^3$$

- **Muestra #2**

$$\rho_s = \frac{1,6039}{1 + \frac{36,625}{100}}$$

$$\rho_s = 1,1739 \text{ gr/cm}^3$$

• **Grado de Saturación del suelo (S_t)**

Es la proporción en que los espacios vacíos del suelo contienen agua.

- **Muestra #1**

$$S_t = \frac{\gamma_b \cdot w \cdot G_s}{\gamma_w \cdot G_s \cdot (1 + w) - \gamma_b}$$
$$S_t = \frac{1,1023 \text{ gr/cm}^3 * 0,38297 * 2,35}{(1 \text{ gr/cm}^3 * 2,35 * (1 + 0,38297)) - 1,1023 \text{ gr/cm}^3}$$
$$S_t = 0,4619$$

- **Muestra #2**

$$S_t = \frac{\gamma_b \cdot w \cdot G_s}{\gamma_w \cdot G_s \cdot (1 + w) - \gamma_b}$$
$$S_t = \frac{1,1739 \text{ gr/cm}^3 * 0,36625 * 2,388}{(1 \text{ gr/cm}^3 * 2,388 * (1 + 0,36625)) - 1,1739 \text{ gr/cm}^3}$$
$$S_t = 0,4915$$

• **Relación de vacíos (e)**

Relación entre el volumen de espacios vacíos y el volumen de las partículas solidas en una masa de suelo

- **Muestra #1**

$$e = \frac{w \cdot G_s}{S_t}$$
$$e = \frac{0,38297 * 2,35}{0,4619}$$
$$e = 1,95$$

- **Muestra #2**

$$e = \frac{w \cdot G_s}{S_t}$$

$$e = \frac{0,36625 \cdot 2,388}{0,4915}$$

$$e = 1,779$$

- **Porosidad (n)**

Es la relación entre el volumen de vacíos del suelo y el volumen total de la muestra, expresada como porcentaje

- **Muestra #1**

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$n = \frac{1,95}{1 + 1,95}$$

$$n = 0,66$$

- **Muestra #1**

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$n = \frac{1,779}{1 + 1,779}$$

$$n = 0,64$$

Después de haber realizado los cálculos respectivos para conocer las propiedades de las muestras inalteradas extraídas a diferentes alturas del terreno encima del túnel tenemos el siguiente cuadro de resumen.

	Muestra #1	Muestra #2
PROFUNDIDAD(m)	11	27
Clasificación SUCS	ML	ML
DENSIDAD APARENTE (gr/cm³)	1,1023	1,1739
GRAVEDAD ESPECIFICA	2,348	2,388
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	43,096	37,351
GRADO DE SATURACION (%)	46,19	49,15
RELACION DE VACIOS	1,95	1,779
POROSIDAD (%)	66	64

Como podemos apreciar los valores que cada muestra obtuvo son similares. Por lo tanto, en este trabajo vamos a suponer que la permeabilidad del terreno por encima del túnel es la misma a lo largo del mismo.

Permeabilidad del Suelo

Según la tabla 9, la cual da valores relativos de permeabilidad podemos estimar que nuestro suelo, al ser un Limo arenoso va a ser un suelo muy poco permeable con valores de coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-5} a 1×10^{-7} cm/seg.

Permeabilidad relativa	Valores de K (cm/seg)	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 * 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	$1 * 10^{-1}$ a $1 * 10^{-3}$	Arena, arena fina
Poco permeable	$1 * 10^{-3}$ a $1 * 10^{-5}$	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	$1 * 10^{-5}$ a $1 * 10^{-7}$	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 * 10^{-7}$	Arcilla

TABLA 9 – Valores relativos de permeabilidad.

Fuente: (Terzaghi K. y Peck, 1980)

Caudal de Infiltración

El túnel de la vía Pintag- Tolontag es un túnel más o menos superficial que se encuentra por encima del nivel freático del sector. Por esta razón, los únicos aportes de agua hacia el túnel van a ser por la infiltración del agua lluvia que se genere en el terreno.

En el área de estudio después de haber realizado los respectivos cálculos con las estaciones pluviométricas cercanas se determinó valores altos de precipitación con un valor de 1516.4mm de precipitación media anual.

La infiltración del agua lluvia en el suelo depende de algunos factores:

- Intensidad y duración de la lluvia.
- Tipo de suelo
- La porosidad y relación de vacíos del terreno.
- La vegetación o tipo de superficie que se encuentre en el terreno.
- La evapotranspiración.
- La evaporación.

El documento *Permeabilidad e Infiltración* elaborada por la Universidad Peruana los Andes, nos ofrece una tabla en el cual nos da la velocidad de infiltración del agua lluvia en relación con el tipo de suelo que tenemos.

TIPO DE SUELO	VELOCIDAD DE INFILTRACION
MUY ARENOSO	20 - 25 mm/h
ARENOSO	15 - 20 mm/h
LIMO-ARENOSO	10 - 15 mm/h
LIMO-ARCILLOSO	8 - 10 mm/h
ARCILLOSO	< 8 mm/h

TABLA 10 – Valores de velocidad de infiltración dependiendo del tipo de suelo
Fuente: (Balbon)

En nuestro caso sería de 10 a 15mm/h debido a que nuestro suelo es un limo arenoso.

Elección del Material para la impermeabilización principal

En el capítulo anterior se presentó los requisitos que deben cumplir los materiales para poder ser utilizados en la fase de impermeabilización principal.

En el mercado ecuatoriano existen empresas que se dedican a la fabricación, comercialización e importación de geo sintéticos. Una de las empresas líderes en el mercado ecuatoriano en la comercialización e instalación de geo sintéticos es PIVALTEC S.A, la cual ofrece productos y soluciones integrales para obras de infraestructuras y protección ambiental con estos materiales.

PIVALTEC S.A. dentro de sus productos, ofrece al mercado ecuatoriano los dos materiales principales que son parte de la impermeabilización principal que se propone en este trabajo, cumpliendo los requisitos que establece la norma española y otras normativas acerca del mismo tema, siendo la mejor opción al momento de elegir el producto.

El producto está realizado bajo las siguientes normativas:

- **UNE 104424.** Materiales y sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P.
- **Swiss Standard SIA V 280, SIA 198, SIA272, SIA 183, 183/2** (Material and waterproofing requirements for geomembranes in tunnel)
- **German Standard DIN 16938, DIN 18195, DS 853/835, DIN 4207** (material and waterproofing requirements for geomembranes n tunnel)
- **Austrian Standard OeNorm B 2209, B 2209-1, B 3700, B3800** (material and waterproofing requirements for geomembranes in tunnel)
- **Italian Standard UNI 8208, UNI 0042** (Material requirements for geomembrane)
- **France Standard CCTG/67/III, CCTP** (Material requirements for geomembrane)
- **EN 13491 (for CE-marking)** (material and waterproofing requirements for geomembranes in tunnel)

Elección del geotextil

PIVALTEC S.A. ofrece al mercado ecuatoriano un geotextil llamado GEODRÉN PLANAR, el cual es especializado para el drenaje en su plano.

- El geo dren planar es un sistema conformado por geotextiles no tejidos de polipropileno punzonados por agujas y geo red de drenaje.
- El geotextil cumple la función de filtración, reteniendo las partículas de suelo.
- La geo red, por su parte, es el medio drenante encargado de transportar el agua que pasa a través del filtro.
- El geo dren planar es el sistema más adecuado para captar y conducir los fluidos en su plano hacia un sistema de evacuación de fluidos.
- Es flexible y se adapta a la geometría del túnel.
- Es resistente a soluciones de alta alcalinidad
- Se presentan en rollos de 50m de longitud y anchos variables de 0,5 a 1m

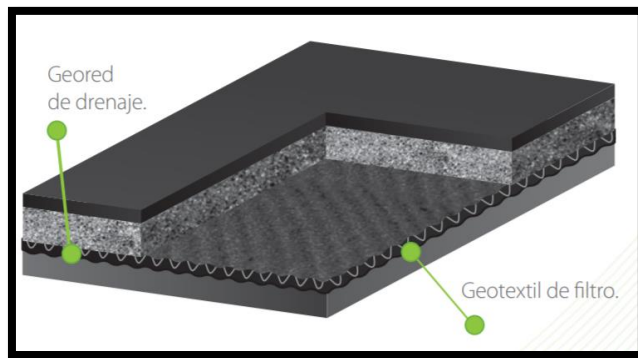


IMAGEN 4.18 – Geo dren Planar
Fuente: GEOSISTEMAS - PAVCO

Elección de la lámina de PVC

Las láminas termoplásticas prefabricadas de PVC no se fabrican en Ecuador por lo que las empresas dedicadas a la comercialización de estos productos como PIVALTEC S.A. se ven en la necesidad de importarlo.

La geomembrana que se ofrece al mercado ecuatoriano es una membrana traslúcida estructurada específicamente diseñada para sistemas de impermeabilización.

- La membrana FLAGON BT/ST 2.0mm es una membrana sintética translúcida de PVC, no reforzada, de una sola capa, hecha por coextrusión y calandrado.
- Es altamente resistente a ataque de microorganismos y a la perforación de raíces.
- Excelente soldabilidad, las láminas pueden ser soldadas aplicando aire caliente por soldadura manual o automática.
- Se adapta a cualquier superficie irregular.
- Resistencia a las condiciones del terreno, tanto químicas como mecánicas.
- Posee una alta estabilidad dimensional.
- Es auto extingible.
- Se repara con facilidad.
- Se presentan en rollos de 2 metros.

Las membranas FLAGON BT/ST 2.0mm son producidas por la fábrica de FLAG que pertenece al grupo SOPREMA en Chignolo d'Isolda (Italia).



IMAGEN 4.19 - Membrana FLAGON BT/ST 2.0mm.
Fuente: CIVIL ROCK- SOPREMA

La membrana FLAGON BT/ST 2.0mm obtuvo los siguientes valores en los ensayos de laboratorio:

	VALOR
Espesor Nominal(mm)	2 (0% a $\pm 10\%$)
Masa por unidad de Área(kg/m³)	1,20 ($\pm 2\%$)
Resistencia a la Tracción (N/mm)	$L \geq 21$
	$T \geq 24$
Resistencia al Desgarro (KN/m)	≥ 70
Alargamiento a la rotura (%)	$L \geq 220$
	$T \geq 260$
Impermeabilidad (m³/m²/d-1)	$< 10^{-5}$
Resistencia Punzonamiento estático(N)	$> 2,1$
Plegabilidad a baja temperatura	sin rotura - 20°C
Resistencia a la perforación de raíces	no se perfora
Envejecimiento térmico en agua: variación de masa después de 6 meses a 23°C	$\leq 0,5 \%$

TABLA 12 – Valores obtenidos en los ensayos de laboratorio
Fuente: CIVIL ROCK – SOPREMA

Mediciones y Cantidad de Material



IMAGEN 4.20- Interior túnel de la vía Tolontag – Píntag

Después de realizar las mediciones en campo y de acuerdo a las dimensiones que nos da el fabricante de los geo sintéticos se obtuvieron los siguientes datos:

HASTIALES = 5,20m

CLAVE = 3,70m

LONGITUD TUNEL = 118m

ANCHO DEL ROLLO DE MEMBRANA = 2m

CÁLCULOS:

- **SUPERFICIE DE CONTACTO (HASTIALES)**

5,20m x 2 x 118m = **1227,2 m²**

- **SUPERFICIE DE CONTACTO (CLAVE)**

$$3,70\text{m} \times 118\text{m} = 436,6 \text{ m}^2$$

- **SUPERFICIE DE CONTACTO (TOTAL)**

$$1227,2 \text{ m}^2 + 436,6 \text{ m}^2 = 1663,8 \text{ m}^2$$

- **VOLUMEN DE HORMIGÓN PROYECTADO (SOPORTE)**

Según la norma española UNE 104424, después de la impermeabilización primaria que es la recolección de filtraciones puntuales, se debe realizar la aplicación de hormigón proyectado para crear el soporte de la impermeabilización principal. El espesor del hormigón proyectado depende si el soporte es de protección o regularización.

En este caso, debido a que existe un terreno duro y no se ha realizado la instalación de anclajes y bulones, se propone realizar un soporte de regularización de 4cm de espesor, específicamente para cumplir con la geometría que se detalla en la IMAGEN 2.5.

$$\text{Volumen de Hormigón Proyectado} = 1663,8 \text{ m}^2 \times 0,04 \text{ m} = 66,552 \text{ m}^3$$

- **NUMERO DE DISCOS DE FIJACIÓN, ARANDELAS y CLAVOS**

El sistema de fijación consta de:

- Arandelas de igual material que la membrana (discos de fijación)
- Clavo y arandela metálica

Por lo tanto, se va a necesitar el mismo número de los 3 materiales.

La norma UNE 104424 recomienda colocar un promedio de 2 unidades/m² en los hastiales y una mayor cantidad en la clave, yo he considerado colocar 4 unidades/m² en la clave.

$$\# \text{ DE ARANDELAS EN LOS HASTIALES} = 1227\text{m}^2 \times 2 \text{ unidades/m}^2 = 2454 \text{ unidades}$$

$$\# \text{ DE ARANDELAS EN LA CLAVE} = 436,36\text{m}^2 \times 4 \text{ unidades/m}^2 = 1745,44 \approx 1746 \text{ unidades}$$

$$\text{TOTAL} = 4200 \text{ unidades}$$

- **NUMERO FRANJAS DE GEOSINTETICO (GEOTEXTIL Y GEOMEMBRNA) COLOCADO**

La norma UNE 104424 sugiere tener un solape de 8cm para la geomembrana PVC para poder realizar una buena soldadura posterior.

$$\# \text{ de franjas o rollos} = \frac{\text{longitud del tunel}}{(\text{ancho del rollo de membrana} - \text{solape})}$$

$$\# \text{ de franjas o rollos} = \frac{118m}{(2m-0,08m)} = 61,45 \approx 62 \text{ rollos}$$

La norma UNE 104424 sugiere tener un solape de 20cm para el geotextil.

$$\# \text{ de franjas o rollos} = \frac{\text{longitud del tunel}}{(\text{ancho del rollo de Geotextil} - \text{solape})}$$

$$\# \text{ de franjas o rollos} = \frac{118m}{(2m-0,20m)} = 65,6 \approx 66 \text{ rollos}$$

- NUMERO DE SOLDADURAS EN LA GEOMEMBRANA PVC

$$\# \text{ soldaduras} = \# \text{ franjas o rollos} - 1$$

$$\# \text{ soldaduras} = \# \text{ franjas o rollos} - 1 = 62 - 1 = 61 \text{ soldaduras}$$

En la siguiente imagen se muestra la disposición de los rollos de la membrana y la colocación de los discos.

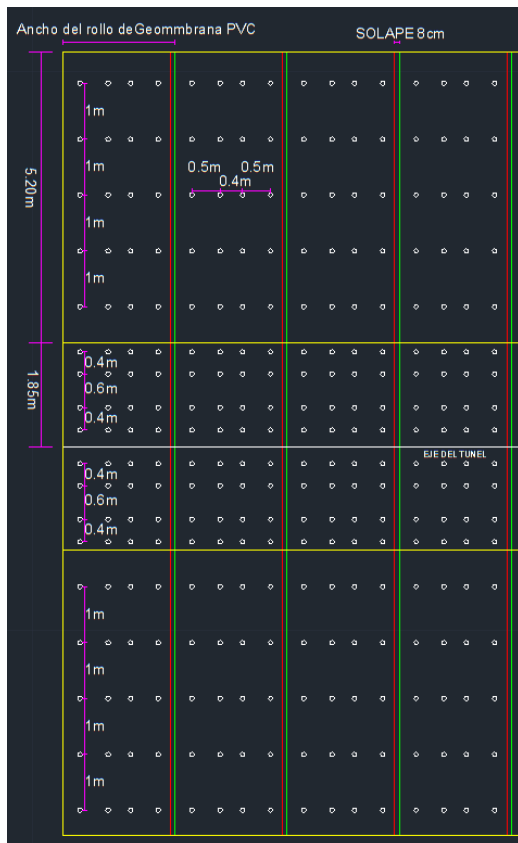


IMAGEN 4.21 – Sistema de fijación de la geomembrana PVC, vista en planta

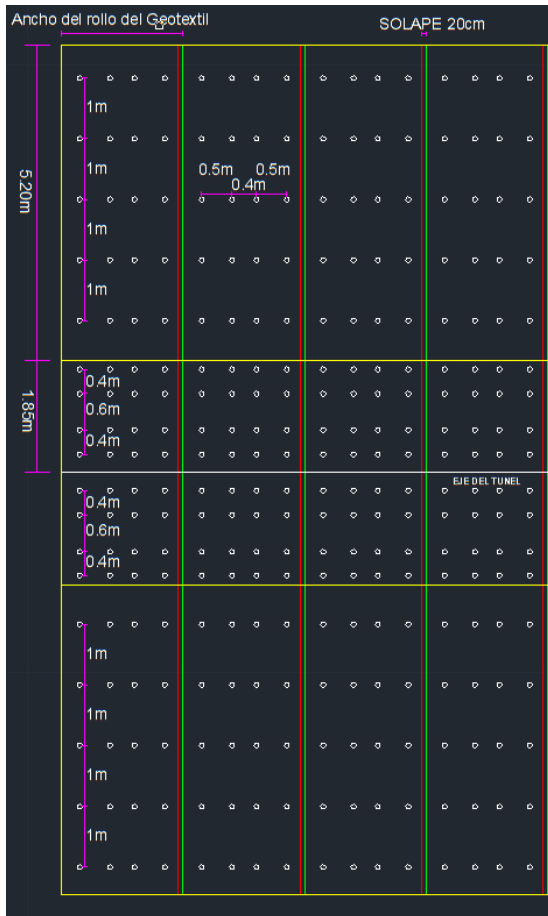


IMAGEN 4.22 – Sistema de fijación del Geotextil, vista en planta

- **CANTIDAD DE TUBERIA PVC PARA DRENAJE LONGITUDINAL**
TUBERÍA CORRUGADA Y PERFORADA DE Ø 200mm de PVC =118m x 2 =236m
- **VOLUMEN DE EXCAVACIÓN PARA DRENAJE LONGITUDINAL**

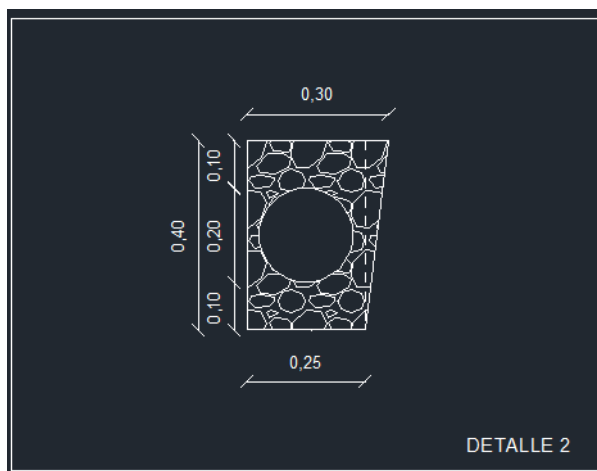


IMAGEN 4.23 – Detalle de la excavación manual para colocación de tubería

Área de excavación

- $25\text{cm} \times 40\text{cm} = 1000\text{cm}^2$
- $\frac{5\text{cm} \times 40\text{cm}}{2} = 100\text{cm}^2$

$$1000\text{cm}^2 + 100\text{cm}^2 = 1100\text{cm}^2 = 0,11\text{m}^2$$

Volumen de excavación:

$$\text{Área de excavación} \times \text{Longitud del túnel} = 0,11\text{m}^2 \times 236\text{m} = 25,96\text{m}^3$$

- CANTIDAD DE MATERIAL GRANULAR (GRAVA) PARA RELLENO

$$\text{Área de la tubería: } \frac{\pi \times (20\text{cm})^2}{4} = 314,16\text{cm}^2$$

$$\text{Area de relleno: } 1100\text{cm}^2 - 314,16\text{cm}^2 = 785,84 \text{ cm}^2 = 0,0786\text{m}^2$$

$$\text{Cantidad de material granular} = 0,0786 \text{ m}^2 \times 236\text{m} = 18,55\text{m}^3$$

- CANTIDAD DE GEOTEXTIL

Franjas de Geotextil = 66

Ancho del rollo = 2m

Longitud que se necesita transversalmente= hastiales + clave + envolver la tubería = 15,56 \approx 16m

$$\text{Cantidad de geotextil} = 2\text{m} \times 16\text{m} \times 66 = 2112\text{m}^2$$

- CANTIDAD DE GEOMEMBRANA PVC

Franjas de Geomembrana PVC = 62

Ancho del rollo = 2m

Longitud que se necesita transversalmente= hastiales + clave + entrar al relleno = 14,3 \approx 15m

$$\text{Cantidad de Geomembrana PVC} = 2\text{m} \times 15\text{m} \times 62 = 1860\text{m}^2$$

TABLA DE RESUMEN

DESCRIPCIÓN	VALOR
ALTURA DE HASTIALES (m)	5,2
ANCHO DE CLAVE (m)	3,7
LONGITUD DEL TÚNEL (m)	118
ANCHO DEL ROLLO (m)	2
VOLUMEN HORMIGON LANZADO. 210Kg/cm ² . 4mm ESPESOR (m ³)	66,552
# DISCOS DE FIJACIÓN, ARANDELAS, CLAVOS (unidad)	4200
FRANJAS DE GEOTEXTIL (unidad)	66
FRANJAS DE GEOMEMBRANA PVC (unidad)	62
CANTIDAD DE TUBERIA PVC (m)	236
VOLUMEN EXCAVACIÓN PARA DRENES LONGITUDINALES (m ³)	25,96
CANTIDAD MATERIAL GRANULAR PARA RELLENO (m ³)	18,55
CANTIDAD DE GEOTEXTIL (m ²)	2112
CANTIDAD DE GEOMEMBRANA PVC (m ²)	1860

Según la empresa colombiana FILMTEX, la cual se dedica a la impermeabilización de túneles con membrana PVC, para tener un rendimiento óptimo se requiere un equipo de trabajo 1:2:4, 1 Ingeniero Residente, 2 técnicos selladores de membrana y 4 ayudantes, el costo estaría de acuerdo a las políticas salariales del país.

Con este equipo de trabajo se tendría un rendimiento de 312m² de instalación en un día.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA ELABORAR EL DRENAJE E IMPERMEABILIZACIÓN DEL TÚNEL “TOLONTAG – PINTAG”

DEFINICIÓN

Este trabajo consistirá en la construcción de desagües subterráneos mediante el empleo de tubería PVC, material granular para relleno(grava), Geotextil, Geomembrana PVC, que facilite el libre escurrimiento de las filtraciones del terreno natural o de la estructura y evitar en esa forma la presión hidrostática al sostenimiento principal, de acuerdo con las presentes especificaciones y de conformidad con los detalles señalados y las instrucciones de la Fiscalización.

- TUBERÍA CORRUGADA Y PERFORADA DE Ø 200mm de PVC

DESCRIPCIÓN

Los trabajos de drenaje que incluyen el rubro, tubería corrugada y perforada están previstos realizarlos bajo la solera del túnel, según detalla la IMAGEN 4.23, que servirán para captar las aguas de infiltración y llevarlas al exterior.

El contratista suministrará todos los materiales requeridos para el drenaje. La tubería deberá ser corrugada y perforada, para ser utilizados en los drenes, objeto de aprobación por parte de fiscalización.

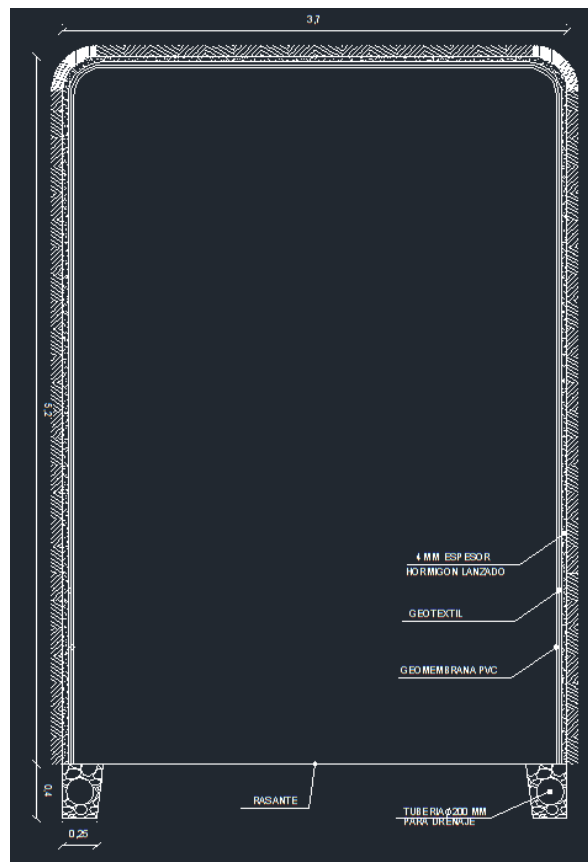


IMAGEN 4.24 – Sección Transversal del túnel

MATERIALES

Los tubos de PVC a ser utilizados para drenes serán corrugados y perforados, y suministrados e instalados como se indica en los planos o como la apruebe fiscalización.

PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

La colocación de tubería corrugada y perforada para drenaje se realizará de acuerdo con las especificaciones descritas en las IMÁGENES 4,23 y 4,24 o donde sea necesario y autorice fiscalización.

Los drenes con tubos de PVC serán construidos de la siguiente manera:

- Excavación manual de la zanja de acuerdo con las especificaciones de la IMAGEN 4.24.
- Colocación de una capa de 10cm de material filtro, posterior a esto se colocará el tubo corrugado y perforado se lo recubrirá con la lámina geotextil.
- Luego se colocará el resto de material filtro hasta el nivel de la cota especificada como nivel de rasante de planos.

MEDICIÓN

La medición se realizará por metro lineal de tubería instalada

FORMA DE PAGO

UNIDAD	RUBRO
M	TUBERIA CORRUGADA Y PERFORADA DE Ø 200mm DE PVC

- **GEOTEXTIL**

DESCRIPCIÓN

Sujetado a los muros del túnel como se muestra en la IMAGEN 4.25, se añade una lámina drenante formado por un geo compuesto sintético. Se trata de un Geotextil resistente que tiene dos funciones, de proteger a la membrana de PVC que después será colocada y de recoger el agua y conducirla por gravedad al dren o tubería de drenaje general.

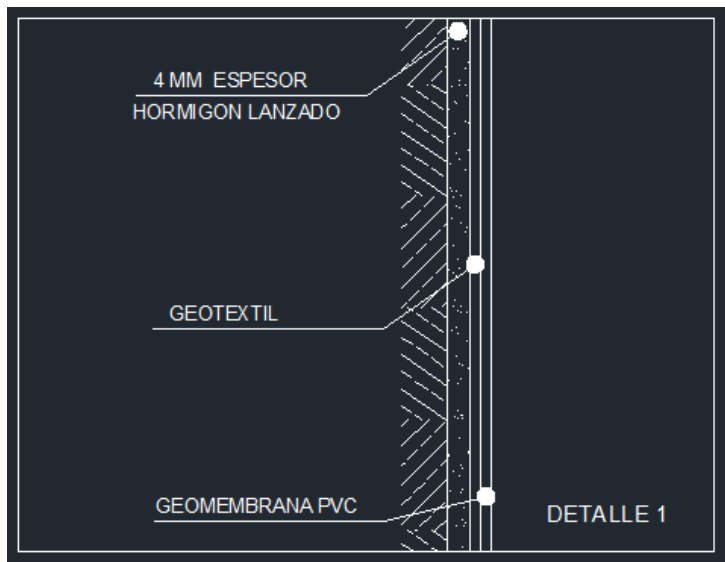


IMAGEN 4.25 – Estructura del Sistema de impermeabilización

MATERIALES

Los Geotextiles serán no – tejidos, elaborados mediante punzonado, resistentes a soluciones de alta alcalinidad y 100% polipropileno.

En los Geotextiles utilizados, se exigirá un alargamiento hasta la rotura no inferior al 45% y una resistencia a la tracción de 15 kN/m

PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

Se caracterizan por tener unas molduras en toda su superficie que permite que el agua entre en ellas y discurra a través del geotextil.

Se instalarán ancladas a la pared según los detalles en la IMAGEN 4.21 y colocadas garantizando los solapes y la salida de agua.

El geotextil se fijará al soporte mediante clavos metálicos con el cabezal protector adecuado, es decir, del mismo material que la geomembrana para permitir una sujeción firme sin rasgaduras mediante soldadura.

Previamente a la colocación del geotextil, se examinará toda la sección a tratar eliminando todo elemento saliente susceptible de producir perforación de acuerdo con la IMAGEN 2.5 y suavizando con mortero de fraguado rápido otros elementos punzonantes no removibles.

Para la colocación de los clavos de fijación, la norma recomienda colocar un promedio de 2 unidades/m² en los hastiales y una mayor cantidad en la clave, se a considerado colocar 4 unidades/m² en la clave, dependiendo del estado del soporte.

El solapamiento entre los rollos de geotextil será de 20cm.

En la parte inferior de la sección, el geotextil se envolverá a la tubería de drenaje longitudinal.

Los operarios para llevar a cabo las tareas de instalación deberán estar debidamente capacitados para el manejo de los útiles y obtención de la calidad exigida, siendo la Fiscalización, la responsable de la supervisión de estos trabajos, exigiendo en su caso las oportunas correcciones.

MEDICIÓN

Para proceder al pago del geotextil drenante se lo realizará por m² efectivamente colocado lo que incluye los clavos de fijación, y debe ser aprobado por Fiscalización.

FORMA DE PAGO

UNIDAD	RUBRO
m2	GEOTEXTIL

- LAMINA IMPERMEABILIZANTE DE PVC

DESCRIPCION

Sujetado a los muros del túnel se añade una lámina drenante formado por un geo compuesto sintético. Se trata de unas láminas de polietileno o material impermeable resistente que tiene la función de recoger el agua y conducirla por gravedad al dren o tubería de drenaje general.

MATERIALES

Las láminas drenantes y de impermeabilización, serán de tipo sintético, cloruro de polivinilo (PVC), soldables por termofusión, mínimo de 2 mm de espesor.

En las láminas de impermeabilización de PVC, se exigirá un alargamiento hasta la rotura no inferior al 300% y una resistencia a la tracción de 15 N/mm² controlada en ambos sentidos, longitudinal y transversal.

PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

Se caracterizan por tener unas molduras en toda su superficie que permite que el agua entre en ellas y discurra a través de la lámina

Se instalarán soldadas a las arandelas del mismo material que la lámina que fueron previamente instalas para la sujeción del geotextil garantizando los solapes.

El solapamiento entre los rollos de la lámina impermeabilizante será de 8cm, debiendo quedar soldada toda la superficie, si la soldadura es manual o automática. En todo momento se evitará la formación de arrugas al soldar, de modo que la unión de las piezas garantice su completa estanqueidad.

En la parte inferior de la sección, el desagüe de las láminas se efectuará sobre la base de gravas según se define en la sección tipo, con las láminas de tipo expandido rectas, selladas sobre la parte superior y protegiendo la parte inferior del hormigón.

Todo elemento o instalación previa que deba ser salvada y que implique el corte o perforación de la lámina, deberá ser convenientemente sellada, mediante parches termo soldados del mismo material y en los remates, mediante masillas adecuadas al tipo de lámina utilizada.

Los operarios para llevar a cabo las tareas de instalación deberán estar debidamente capacitados para el manejo de los útiles y obtención de la calidad exigida, siendo la Fiscalización, la responsable de la supervisión de estos trabajos, exigiendo en su caso las oportunas correcciones.

La lámina impermeabilizante dispuesta entre el sostenimiento y el revestimiento encamina el agua hacia el tubo dren poroso que se sitúan longitudinalmente en la parte inferior del túnel según los planos y dentro de la matriz de grava drenante.

MEDICIÓN

Para proceder al pago de la lámina impermeabilizante de PVC se lo realizará por m² efectivamente colocado lo que incluye la soldadura de la lámina a las arandelas del mismo material, y debe ser aprobado por Fiscalización.

FORMA DE PAGO

UNIDAD	RUBRO
m2	LAMINA DRENANTE IMPERMEABLE DE PVC

COMPARACIÓN DEL TUNEL CON, Y SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN.

TUNEL "TOLONGAG - PINTAG"		
	CON SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN	SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN
I	Evita el contacto del revestimiento definitivo con agentes agresivos que se encuentran en los suelos y aguas subterráneas.	No protege al revestimiento definitivo.
II	No se genera imperfecciones en el revestimiento definitivo como grietas o poros en el hormigón debido a procesos de lixiviación.	Se generan imperfecciones en el Hormigón del revestimiento definitivo, ya que se disuelve los compuestos de la pasta de cemento endurecido.
III	Controla filtraciones de agua subterránea hacia el interior del túnel.	Existe filtración de aguas subterráneas
IV	Menor mantenimiento	Mayor mantenimiento
V	Menores procesos de reparación posterior	Mayores procesos de reparación posterior
VI	Mayor durabilidad	Menor durabilidad
VII	Brinda mayor confort y seguridad al usuario.	Da una apariencia de poca seguridad.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

De acuerdo con lo que se observo y analizó, se puede determinar las siguientes conclusiones:

- Se concluye que la calidad del suelo donde se realizó la excavación del túnel “Tolontag – Píntag” es muy buena, de acuerdo con la clasificación SUCS realizada en es un ML, limo arenoso de consistencia duro.
- A pesar de que la permeabilidad obtenida mediante correlaciones por el tipo de suelo nos indica que el suelo es poco permeable, podemos decir que la humedad natural del terreno tiene un promedio de 40,22% de acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio de Suelos, por lo que podríamos clasificar como muy húmedo y con el tiempo puede causar desprendimientos dentro del túnel, siendo necesario un plan de estabilización de la bóveda y hastiales del túnel, por lo que nos serviría nuestro estudio que planteamos se recubra con geomembrana de PVC.
- Conociendo que los valores de precipitación media anual del sector donde se encuentra ubicado el túnel, que es de 1516,4 mm de acuerdo con la TABLA 6 y el coeficiente de permeabilidad del suelo que varía entre $1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-7}$ cm/s de acuerdo a la TABLA 9 podemos deducir que la filtración de agua hacia el interior del túnel va a ser mayor que 0,01 lts/m² en 24 horas, valor que señala la TABLA 1, donde nos indica la filtración permitida con respecto a la utilización de la obra. En este caso es un túnel de montaña y se debe tener las condiciones óptimas para su utilización. Por lo tanto, es necesario realizar la propuesta de un sistema de impermeabilización de grado 4 donde indica que las características de humedad deben ser casi secas.
- Podemos indicar mediante la presente disertación que es factible realizar la impermeabilización de túneles en el Ecuador mediante la utilización de geomembranas PVC, ya que, de lo único que depende poder establecer este sistema, es conocer el caudal de infiltración que existe hacia el interior del túnel y poder determinar el grado de impermeabilización de éste, dependiendo del uso que se le va a dar al túnel como indica en la TABLA 1.

RECOMENDACIONES

- Durante el proceso de recolección de información para la elaboración de este trabajo me encontré que no existe información con respecto al país, está oculta o simplemente no hay colaboración con las autoridades competentes para conocer acerca de los túneles en el Ecuador. La información técnica de la construcción de túneles en el país debe ser de conocimiento público para que los estudiantes y profesionales del sector de la construcción puedan conocer acerca del tema y conocer los diferentes procesos constructivos que se realizan a nivel nacional. La impermeabilización en los túneles del Ecuador se podría decir que cada uno (el que sea dueño del contrato) lo hace a su manera, ya que no contamos con normativa y cada empresa que se dedica a la construcción de túneles dentro del Ecuador se basa en diferentes normativas y diferentes procesos los cuales están abiertos ya que no existe una norma puntual que regularice y controle los diferentes procesos que involucran su construcción. Así como existen diversas normas de construcción en el Ecuador como son la NEC-SE-VIVIENDA, NEC-SE-ESTRUCTURAS DE ACERO, etc. Mediante este trabajo se propone la adopción de la norma española UNE 104424 para la impermeabilización de túneles para tener obras de calidad y que duren a través del tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. Pennsylvania: ASTM International.
- Asociación Española de Normalización y certificación . (2015). *Sistema de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P*. MADRID: AENOR.
- Balbon, R. (n.d.). *Permeabilidad e Infiltración*. LIMA: Universidad Peruana Los Andes.
- Ballester, F., Castro, D., & Gil, M. (2000, 10 30). Definición, función y clasificación de los geotextiles. *Obra Pública*, pp. 1-4.
- CIVILGEEKS. (2011). *INGENIERIA Y CONSTRUCCION*. Retrieved from METODOS DE PERFORACION DE TUNELES: <https://civilgeeks.com/2011/09/22/metodos-de-perforacion-de-tuneles/>
- Das, B. M. (2014). *Principios de Ingeniería de la Fundación*. Boston: Global Engineering.
- Das, B. M. (2014). *Principios de la Ingeniería de la Fundación*. Boston: Global Engineering.
- Garshol, K. F. (2009). *Shotcrete for Underground Support XI*. Retrieved from COST EFFICIENT WATERPROOF TUNNEL LININGS: <http://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=shotcrete>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Píntag. (2012, Agosto). *Plab de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia de Píntag*. Retrieved from http://www.pichincha.gob.ec/phocadownload/leytransparencia/literal_k/ppot/dmq/pdot_pintag.pdf
- Jose Escorihuela, O. F.-P. (n.d.). *Materiales Construcción*. Retrieved from Durabilidad del Hormigón: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/1247/1375>
- Lane, K. S. (2013, March 12). *Encyclopædia Britannica* . Retrieved from tunnels and underground excavations: <https://www.britannica.com/technology/tunnel>
- Luis I. Gonzáles de Vallejo, M. F. (2004). *Ingeniería Geológica* . Madrid: PEARSON EDUCATION, S.A.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2018, Enero 8). *COCA CODO SINCLAIR*. Retrieved from <http://www.energia.gob.ec/coca-codo-sinclair/>
- Ministerio de Obras Públicas. (n.d.). *GOBIERNO DE CHILE*. Retrieved from Métodos de Excavación de Túneles: <http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/tuneles/Paginas/M%C3%A9tododeExcavaci%C3%B3n.aspx>.
- Montes, J. G. (2011). Retrieved from Recursos Hidrogeológicos: <http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wp-content/uploads/2011/07/recursos.pdf>

- Municipio de Quito. (2018, Enero 8). *Metro*. Retrieved from <http://www.metrodequito.gob.ec/metro.php>
- NORMALIZACIÓN ESPAÑOLA. (2017, DECEMBER 1). *INFORMES DE NORMALIAZCIÓN*. Retrieved from LA NORMALIZACIÓN: http://www.aenor.es/DescargasWeb/normas/normalizacion_UNE.pdf
- Oscar Joel Méndez Trelles, T. F. (2009). *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Retrieved from Mateirales utilizados en la construcción del Túnel San Eduardo de la ciudad de Guayaquil: Características e Importancia de su uso: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/13340/Tesina%20materiales%20utilizados%20en%20la%20construcci%c3%b3n%20del%20T%c3%ban el%20Sa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Palma, A. A. (2005, Mayo 12). *IMPERMEABILIZACION TUNEL LAS RAICES*. Retrieved Enero 16, 2018, from <http://cybertesis.uach.cl/>: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcih556i/doc/bmfcih556i.pdf>
- Sandoval, L. G. (2005). *Impermeabilización y sistema de subdrenaje en túneles*. Bogotá: PAVCO.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2017, Noviembre 15). *Manual de diseño y construcción de túneles de carretera*. Retrieved from http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP012.pdf
- Vargas, J. A. (2011). *Pontificia Universidad Javeriana*. Retrieved Enero 16, 2018, from Análisis del concreto lanzado como revestimiento definitivo para túneles: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7538/tesis605.pdf?sequence=1>
- Winckfll, A. (1999). *Relieve y geomorfología del Ecuador*. Quito: Departamento de Geomorfología y Teledetección del Programa Nacional de Regionalización Agraria & Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador.

ANEXOS

Para poder obtener una estimación de las lluvias en el sector se realizó los siguientes cálculos con las estaciones pluviométricas cercanas a la zona.

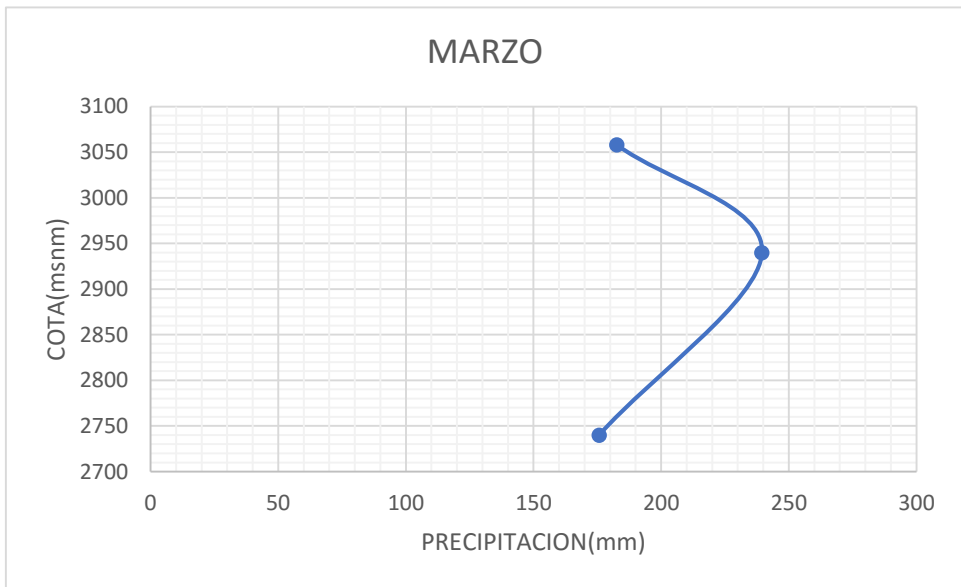
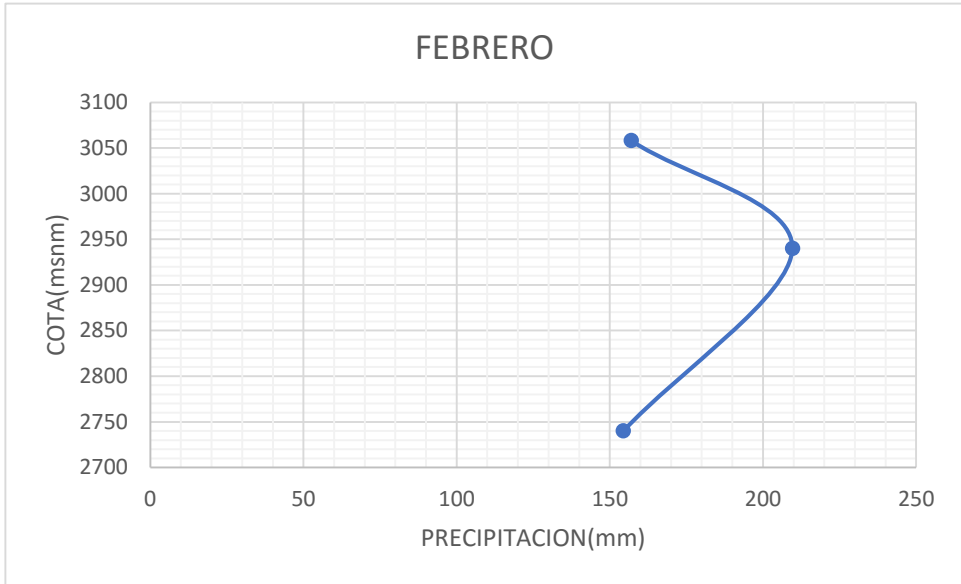
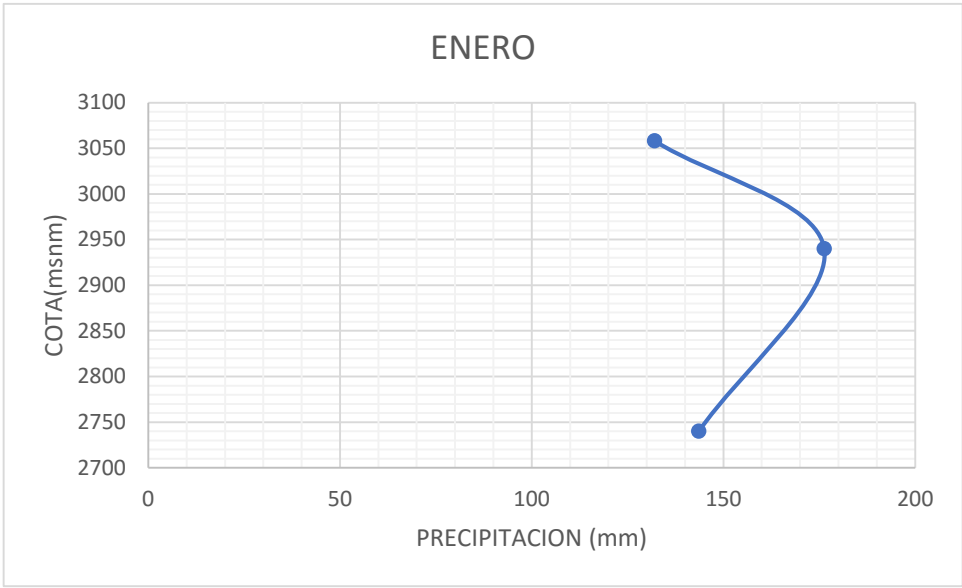
PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)												
ESTACION METEOROLÓGICA 1												
NOMBRE:	UYUMBICHO		CODIGO:	M0113								
PERIODO:	1931-2015		LATITUD:	0G 23'50" S		LONGITUD:	78G 31'51" W		ELEVACION:	2740		
AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGT.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.
1931	58,6	135,5	209,1	267,3	162,1	101,6				145,3	98	207,5
1932	305	142,9	119,6	359	289,2	36				44,3	59,7	120,5
1936		133,8	191,3	117,6	179,5	118,5	13,9	4,5	28,6	86,2	47,9	165,4
1937	115,2		251,8	61,4	239,3	54,7	59,8	5,7	186,5	49,5	77,2	162,6
1938	207,4	140,9		320,2	206,3	51,1	146,6	44,3	181,2	131,2	56,2	236
1939	171,6	204,9	201,1	133	188,4	146,2	71,3			9,4	97,1	113,7
1940	145,2	205,1		79,5	206	138	0,2			94,1		130,8
1941	176,2	177,6	134,7	208,4	154,6	18,4	3,7	5,4	35	13,6	42,2	156,9
1942	107,5	144,9	196,1	140,1	157,2	101,7	0,7					
1962				157,2	118,2	93,6	3,8	20,3	64,1	109,8	193,3	98,1
1963	171,8	215	149,6	192,1	80,1	64,1	60	24,8	20,7	175,2	221,8	207,7
1964	90	134,1	91,2	269,1	143,6	133,1	60,4	59,7	38,7	95,5	202	138,9
1965	128,3	110	256,5	243,1	188,4	23,8	4,7	6	109,9	262,5	296,6	195,1
1966	100,8	151,6	134,6	142,3	257,1	69,7	37,8	70,3	60,1	175,5	202,9	237,4
1967	285,2	525,4		256,6	195,2	64,7	22,5	15,1	81,9	266,5	170,4	203,8
1968	179,5	212,9	241,7	219,9	50,8	71,9	41,8	60,2	130,6	147,3	103,4	60,5
1969	139,5	188,9	191	316,2	217,9	128,1	0	7,3	96,3	164,6	144,2	229,5
1970	181,5	318,5	150,8	206,9	183,7	33,2	18,1	34,5	112,6	99,9	297,1	195,5
1971	362,8	363,6	303,6	139,8	172,8	172,5	5,6	56,6	152,8	272	164,8	109
1972	287,6	156,4	207	159,2	147	92	6,6	27,8	29,8	83,6	197,6	83,8
1973	72,6	66,6	172,2	253,4	130,4	79,4	45,2	50,6	112,6	120,2	48	112
1974	101,2	301,2	269,2	141	135,6	93,2	34,4	25,6		208	270,6	141,4
1975	78	176	254,8	157,2	142,6	103	109,2	51,8	60	144,6	166,2	98,2
1976	153,6	109,8	266,6	221,4	63,2	37,2	1,4	5,6	35,2	43,8	55,9	64
1977	107,2	57,6	119,6	152,4	66	77,2	0	52,6	71,8	103,6	53,9	210,8
1978	112	20	86,4	194,2	114,6	13,4	90,6	30,8	102,6	24,2	67,2	63,8
1979	62,8	48,4	161,4	121,4	135,6	46	45,1	87,4	120,6	61,8	35,5	31,2
1980	155,7	219,7	118,2	209,5	45,8	28	15	17,6	75	132,2	154,9	80,3
1981	180,6	200,3	201,6	179,2	137,2	50,6	23,2	53,2	29	132,2	46,7	83,6
1982	60,6	109,8	182,8	133	270,7	12,7	10,8	0	127,4	135,8	225,5	85,6
1983	214,3	49,9	143,7	253,8	167,4	33,3	0	31,8	0	132	209	201,4
1984			186,7	383,4	94,4	132	35,2	24	134,2	159,7	95,6	89,9
1985	93,9	18,5	143,7	115,1	150,6	48	1,8	18,8	250,7	22,8	52,1	125,2
1986	218,8	340	226,9	364,9	335,9	42,2	0	24,1	108,9	84,6	167,3	199,3
1987	112,8	32,3	187,6	227,3	364,4	21,7	51,7	63,4	75,6	62,8	19,5	0
1988	63,9	88,2	192,7	310,7	356,7	92,4			135,4	154,9		
1990			82,1	296,3	83,4	25,8					175,7	
1991			114,7			45	24,6	4,3	87,8	114	175,7	190,2
1992	98,7	70,3	114,7	96,3	101,5	20,5	21,8	12,5	85,4	124,1	77,4	33,8
1993	158,9	174,5	363,7	206,5	69,7	133,1	14,3	14		123,2	72,8	79,8
1994	89	142,8	155,1	190,3	131,8	28,7	9,3	6,2	29,9	56,6	131,4	125,8
1995	0	0	76,2	143,4	56,3	59,1	182,4	51,1	6,4	71,4	38,4	62,6
1996	132,1	70,3	173,2	114,4	117,5	30,2	0	25,7	93,1	66,8	47,1	66,3
1997	154	19,9	42,7	113,2	80,3	12	14,6	22,2	54,5	39,8	120,3	58,1
1998	81,8	60,1	52,7	119,5	107,4	23,4	19,2	49,6	44,1	97,4	104	32,9
1999		185	166,1	106,8	113,9	100,6	6,3	27,3	122,8	143,2	73,4	282,8
2000	132,2	158,2	202,2	171,7	213,8	100,5	74		128,5	71,7	1,1	32,6
2001	159,9	190,8	104,9	31,4	28,2	1,3	0	0	0	0	58,1	173,6
2002	65,1	48,4	201,3	190,4	67,3	30	19,3	0,8	18	140,7	206,8	157,2
2003	87,6	204	120,8	165,5	171,4	100,1	13	8,7	89,5		155,6	202,5
2004	108,8	102,5	67,9	115,8	155,4	19,3	32,1	0	87,2	119,9	146,8	190,3
2005	45,9	238,2	201	141,6	74,2	55	42,9	41,2	45,2	69,8	105,7	239,8
2006	132,9	175,9	135,5	222,8	90,7	91,2	10	22,8	75,9	88,7	242,8	146,2
2007	139,4	45,7	195,3	206,4	154	44	66,7	32,2	16,7	142,3	279,3	137
2008	280,9	210,7	212,2	271,5	256,7	84,7	42,5	91,3	97	132,3	148,7	152,7
2009	309,3	195,2	326,1	138,9	104,7	75,3	9,4	34,2	9,5	89,3	82,2	228,8
2010	54,1	138,5	106,2	308,8	133,5	19,9	108,1	26,3	76,4	69,3	203,6	260,6
2011	278,2	220,2		257,3	70,6	63,8	66,2	47,7	66,6	206,2	25,2	150,1
2012		197,5	178,1	219,1	50,6	30,2	19,3	17,4	35,8	137,1	134,4	55,1
2013	101,1	244	120,7	95,3	268,9	6,2	9,6	60,4	28,8	151,7	71,9	68,6
2014	136,9	152	309,8	98,7	218,5	28,8	8,5	41,1	56,9	146,1	81,9	84,2
2015	147,9	55	249,5		105,4	19,1	23,6	14,4	23,7	94,3	198,6	53,5
PROMEDIO	143,5709	154,3859649	175,7281	190,4783	152,22712	62,43548	31,8192982	30,20741	76,80556	112,6288	127,1051	133,9746

ESTACION METEOROLÓGICA 2													
NOMBRE:	RUMIPAMBA-PICHINCHA		CODIGO:	M0353									
PERIODO:	1964-2015		LATITUD:	0G 25' 51.8"	LONGITUD:	78G 25'6.8" W			ELEVACION:	2940			
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1964								30,6	66,8	61,3	97,6	103,6	209,3
1965	136,4	103,7	169,8	250,5	140,4	2	1,3	10,8	148,3	173,6	366,5	187	
1966	66,3	126,6	124,7	144,7	211,7	36,1	18	45,2	79,9	199,4	203,6	205,7	
1967	138,1	238,1	262,8	39,2	108,8	30	28,2	6,8	26,6	167,1	109,5	138,8	
1968	177,7	204,8	183,9	156,1	34,6	106,2		57,4	113,9	176,2	113,8	117,3	
1969	142,1	143,8	96,5	390,4	56,8	160,9	9,9	4,8	192,6	226,8	173,7	183,9	
1970	171,1	296,6	114,7	148,7	137,5	38,8	5,3	4,2	71,5	127,8	195	228,5	
1971	253,9	320,9	303	122,6	88,4	70,3	11,9	20,9	96,5	302,9	179	255,6	
1972	244	156,7	241,7	213,7	120,6	49,9	0	42,8	11,3	93,4	228,9	73,3	
1973	64,9	104,4	145,5	225,8	133,5	83,4	85	55,7	104,8	45,9	119,5	120,9	
1974	151,4	329,7	312	130,8	114,1	23,8	48,1	20,7	92,1	196,7	170,3	195,6	
1975	123,8	263,8	179	133,8	66,8	74,1	116,4	40,6	38,5	152,4	215,6	278,1	
1976	113,6	165,2	264,6	146,2	108,1	43,3	0	0	88	142,3	107,8	206,6	
1977	49,6	54,9	129,1	128,5	72	92,4	15,6	32,5	106,9	121,7	135,4	239,2	
1978	101,3	81,4	92,1	226,7	107,3	0	123,6	44,1	58,7	58,4	87,6	277,8	
1979	106,3	143,9	380,3	117,7	216,8	21	71,9	112,3	116,4		88,9	71,8	
1980	159,6	317,5	78,8	192,4		12,3		54,9	93,3	149	203,6	153	
1981	157,8	157,1	199,9	239,4	127,9	29,4	21,6	78,7	16,8	162,4	160,1	152,7	
1982	293,4	137,2	249,6	119,5	112	52,1	25,4	0	117	113,6	160,4	237	
1983	158,2	156,2	215,3	187,3	168,7	11,2	18,6	63,9	19,1	163,4	93,9	207	
1984	259,3	191,7	187,1	232,2	129,8	65,8	6,8	51,9	157	156,7	136	100,4	
1985	142,8	14,6	80	78,2	50,9	25,7	37,9	13,6	82,7	36,3	68,4	142	
1986	153,7	107,8	195,1	141,2	98,3	0	0	0	48,9	177,3	121,1	77,6	
1987	113,9	83,7	223,3	180,5	76,4	34,1	54,5	65,3	63	196,7	120,6	69,4	
1988	94,7	148,6	52,1	242,5	140,5	62	28,2	49,4	86,8	133,3	295,6	125,3	
1989	225,2	151,2	246,5	149	55,3	103,3	0	13	121,6	250,5	103,3	74,5	
1990	90,1	211	142,7	225,8	51,2	25	22,6	54,8	33,7	209,4	33,5	136,8	
1991	123,4	152,8	308,1	147,9	119,4	47,9	25,4	0	99,7	84,7	190,1	216,3	
1992	73,8	182,6	130,5	92,4	54,8	31,1	15,8	40,3	132,7	116,6	116,1	100	
1993	170,6	189,3	138,7	157,1	112,5	24,9	16,8	0	85,2	132,6		238,1	
1994	193	135,2	283	207,5	103,3	26,1	18,9	5,4	47,4	169,1	183,3	198,2	
1995	61,7	148,4	182	154,4	128,5	31,9	59,3	78	0	146,7	142,1	146,3	
1996	253,5	195,8	235,6	195,9	180,1	48,4	72,1	39,6	27,3	200,6	70,5	123,2	
1997	279,8	139,8	200,5	112,3	81,7	176,5	33,9	7,5	61,6	164,7	296,4	129,3	
1998	79,2	112,9	174	128,8	123,1	26,8	28,9	42,8	30,6	141,6	287,8	94,2	
1999	204,7	328,1	180,2	151,5	127,2	96,7	7,6	35,8	101,2	91,6	164,9	234,7	
2000	271,5	243	267,5	194,1	295,6	116	70	28,8	156,4	88,3			
2002				100,8	113,9	64,6	22	14,7	11,1	247,2	191,3	347,4	
2003	97,7	21,6	217,4	311,3	173,4	92,1	0	28,5	142	161,8	144,5	60,3	
2004	68,8	135,7	44,6	219,3	197,1	32,9					95,8	331,8	
2005	128,7	282,8	237,7	190,1	83	19,6	32,2	11,7	53,4	85	196,3	113,2	
2006	302,8	541,9	745,1	234	181,4	213,1	0	8,1	0	112,5	235,7	138,7	
2007	29,5	162,9	488,2	295,1	289,4	16,7	0	62,5	0	199,6	168	310,4	
2008	329,2	737,1	921,2	603,4	565,3	533,3	234,3	381,1	108,1	352,8	421,5	577,8	
2009	1034,9	662,9	678,7	312,2	243,6	37,7	9,6	30,4	5,5	93,2	30,9	207,6	
2010	33,6	59,5	25,3	238,9	193,9	129,2	68,5	23,8	76	81,4	336	392,1	
2011	194,8	410,8	518,8	658	292,7	92,4	59,4	109,5	78,9		111,1	87,6	
2012	250,3	319,9	203,5	375	57,7	0	17,2	0	5,6	145	134,5	70,7	
2013	141,4	182,7	4,3	235,9	141,2	0	0	55,6	0	102,9	109,9	128,4	
2014	316,7	326,1	219,8	135,7	132,1	15,8	0	0	4,2	135,8		111,9	
2015	110,7	187,7	458,6	93	11,4	25,9	29,2	0	7,7	31,2	17,6	14,2	
PROMEDIO	176,3163	209,6040816	239,4571	202,16	137,36122	63,054	33,3854167	40,304	69,636	148,2438	161,2396	176,75	

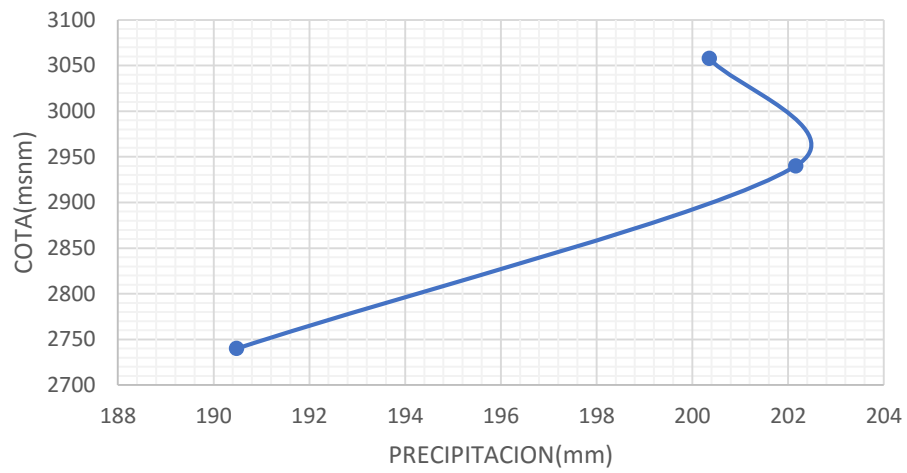
ESTACION METEOROLÓGICA 3												
NOMBRE:	IZOBAMBA		CODIGO:	M0003								
PERIODO:	1962-2016		LATITUD:	0G 21'57" S	LONGITUD:	78G 33' 18" W	ELEVACION:	3058				
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1962		176,2	236,4	134	121,3	94,8	6,1	13,1	39,5	74,3	162,3	52,4
1963	199,5	185,3	201,6	176,8	97,6	59,5	60	29,7	41,5	102,3	107,3	176,9
1964	57,9	59,2	46,1	314,8	83	84,7	43,2	71,7	32	93,1	169,4	112,5
1965	159,9	67,3	198,6	284	157,5	2,5	5,3	10	143,5	209,5	236,8	129,8
1966	91,3	123,3	112,4	159,3	193	84,7	30,7	24,5	65,6	154,6	107,9	95,2
1967	147,8	262,8	176	72,8	118,4	61,9	21,9	14,2	39	195,2	72,5	38,9
1968	80,6	159	220,5	143,3	28,7	69,2	28,6	56,7	103,8	155,1	133,9	77,2
1969		269,8	222,5	275	158,6	106,6	0,7	16,5	153,4	174,2	146,2	217,6
1970	164,5	284,5	120,6	159,7	211,4	52,2	8,3	27,3	77	104,9	236,9	159,1
1971	222,6	302	286,9	111,7	107,7	153,9	4,2	56,9	107,9	208,1	130,4	106,9
1972	218,4	155,1	236,2	177,6	134,4	98	7,1	41	28,4	77	224,3	119
1973	91,1	79,1	186	234,4	188,7	91	60,9	45,4	113,7	132	75,5	114
1974	81,9	214,9	186,7	173,2	126,5	97,3	25,8	39,7	108,5	272,1	195,6	175
1975	105,3	263,9	191,7	166	156,1	81,7	133,2	55,1	76,8	174,1	190,5	133,1
1976	129	155,8	248,7	234,2	134,1	47,6	7,5	20,2	40,1	83,8	128,3	112
1977	135,2	101,6	133,8	130,4	57,7	110,2	28,5	64	123,1	97,9	49,4	134,4
1978	77,7	77,5	172,5	188,3	169	9	68,3	65,8	97,2	37,4	66,5	129
1979	71,2	49,8	193,4	164,1	166,9	47,2	28,3	72,6	175	62,6	50,9	32,8
1980	76,2	152	119,6	153,4	64,4	31,1	14,3	36,7	63,4	216,4	172,1	77,6
1981	95,6	168,2	223,8	240,9	93,8	76,8	48,6	81,2	40,9	191,4	161,7	142,3
1982	211,5	125,8	157	176,3	228,6	31,9	34,4	1,2	99,2	161,4	184,8	367,9
1983	133,2	87,1	205,4	230,6	215,6	60,9	19,2	40,7	58,5	121,2	137,2	247,1
1984	69,7	311,8	213,3	261,4	174,5	68,9	28,2	54,8	143,2	163,5	200,3	116,5
1985	126,3	32,1	69,4	104,7	197,7	54,3	23,3	48,5	90,7	68,1	62,3	106,2
1986	186,4	124,8	143,5	251,6	203,6	25,7	2	21,3	75,1	163,1	152,8	66,8
1987	114	82,2	126,5	159,5	118,9	15,9	37,3	50,5	108,6	116	40,8	24,3
1988	156,6	219,5	32,9	351,5	187,2	101,8	42,1	68,6	134,6	164,2	215,7	96,9
1989	230	188,7	200	156,5	100,1	112,2	40,6	24,5	118,6	186,4	39,2	20,4
1990	76,7	157,4	62,4	292,5	85,7	15,2	65,4	25,1	43,5	19,6	48,6	74,1
1991	125,4	104,7	180,8	95,4	147,7	91,2	43,9	14,4	116,7	133,5	138,8	142,3
1992	53,9	80	98,6	178,1	121,8	37,4	24,7	17,4	114,9	118,8	88,5	92,7
1993	141,9	227,3	237,4	234,3	130,5	9,7	21,7	17,1	91,4	88	102,3	244,9
1994	180,6	211,7	244	220,6	224,7	11,5	24,5	7,6	86,8	75,2	197,2	159,5
1995	53,9	61,4	208,4	168,8	107,9	84,8	53,2	100,5	50,7	137,1	209,9	124,9
1996	160,9	220,7	223,7	237,4	212,5	75,2	30	39,8	45,6	163,6	74,2	83,6
1997	233,4	102	194,9	168,1	104,1	112,8	4,6	17	71,1	150,5	250,3	195,3
1998	83,1	143,2	205,9	264,7	224,9	49,6	37,6	72	57,4	192,5	181,4	44,7
1999	93,4	251,3	269,5	152,3	201	134,5	7,9	43,6	157,2	104,2	160,3	192,7
2000	161,2	184,6	268,8	231,4	250,5	137,7	42,6	28,8	167,7	49,9	57,9	73,7
2001	144,8	168,2	226,3	133,6	102	38,2	36,1	12,4	91,4	7,9	119	192,6
2002	94	93,4	201,4	248	132,7	69,7	26,5	11,8	22,9	129,6	185	243,6
2003	144,7	104,4	111,5	183,7	118	117,8	7,9	32,2	101,3	153,2	200,1	110,5
2004	58,9	66,1	74,8	150,4	147,4	24,3	28,6	3,1	98,7	136,3	152,7	187,7
2005	33,3	201,4	210,2	115,7	100,1	66,8	50,6	53,9	84,1	83,7	105,8	159,4
2006	93,3	188,8	167,5	262	76,3	92,2	13,1	23,6	51,6	76,5	245,9	174,6
2007	171,3	55,1	229,9	264,3	243,6	59,7	62,6	34,8	16,4	201,9	326,2	117,8
2008	246,6	275,5	263,5	257	216,4	111,5	28,5	96,7	103,1	199,5	108	126
2009	295,4	186,6	262,4	289,9	102,8	48,2	7,1	29	9,7	86,4	88,8	209,9
2010	45,6	103,7	114,2	289,2	149,2	100,4	196,2	52,5	79,5	89,7	249,4	304,8
2011	138,3	193,3	143,7	262,4	92,8	61,4	69,4	76,7	56,9	197,6	30,4	164,9
2012	254,3	227,3	197,4	219,3	64,9	10,6	19,8	20	20,5	167	169	30,5
2013	43,7	230,5	128,1	101,9	239	9,8	8,3	43,5	38,9	191,5	45,9	79,6
2014	177,9	135,4	242,3	141,6	186,9	43,3	12,5	49,9	78,5	132,1	112,8	79,8
2015	94,9	78,9	233,3	152,2	102,4	10,6	30	6,6	21,4	118,2	193,4	49,7
2016	166,6	103,7	185,2	318,7	131,4	44,3	18,4	10,6	82	110,9	28,9	193,3
PROMEDIO	132,1019	157,0163636	182,6927	200,3545	145,67636	65,45273	33,2781818	38,05455	81,06727	132,2691	140,4036	131,5436

Cuadro de resumen de las precipitaciones mensuales medias

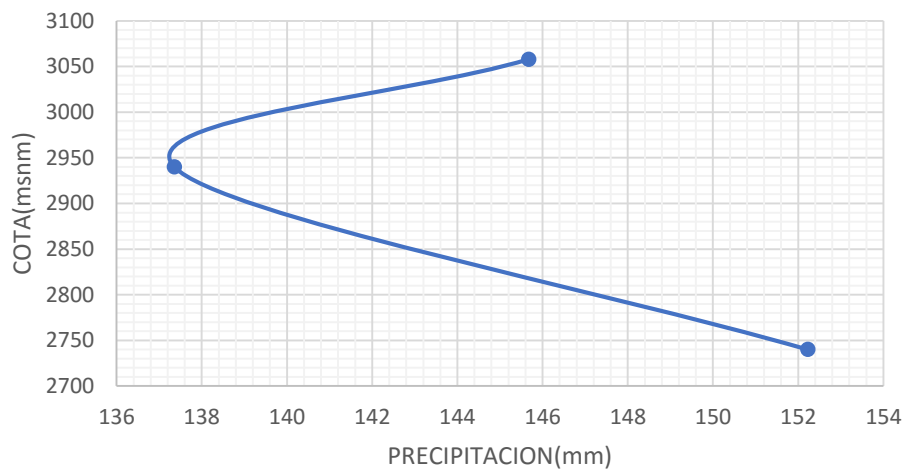
CÓDIGO	ESTACION METEOROLÓGICA	ALTURA (m)	PRECIPITACIONES MEDIAS (mm)											
			ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGT.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.
M0113	UYUMBICHO	2740	143,5709	154,386	175,7281	190,4783	152,2271	62,43548	31,8193	30,20741	76,80556	112,6288	127,1051	133,9746
M0353	RUMIPAMBA-PICHINCHA	2940	176,32	209,6	239,46	202,16	137,36	63,054	33,39	40,304	69,64	148,24	161,24	176,75
M0003	IZOBAMBA	3058	132,1019	157,0164	182,6927	200,3545	145,6764	65,45273	33,27818	38,05455	81,06727	132,2691	140,4036	131,5436



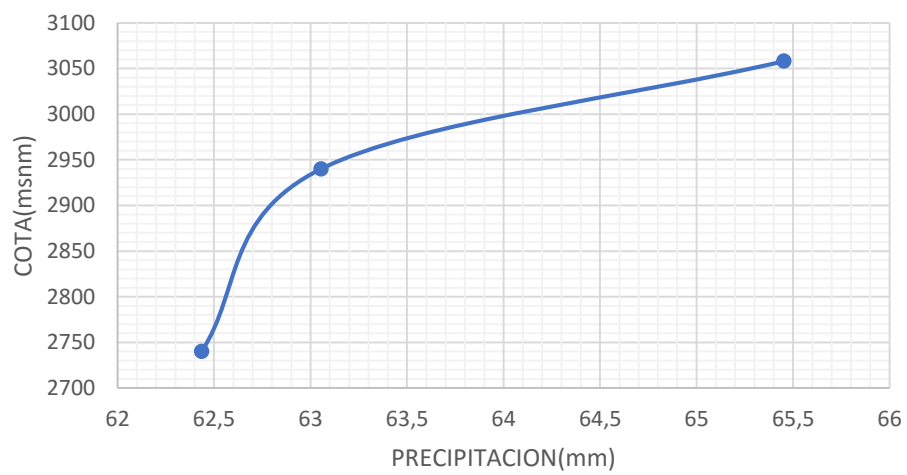
ABRIL



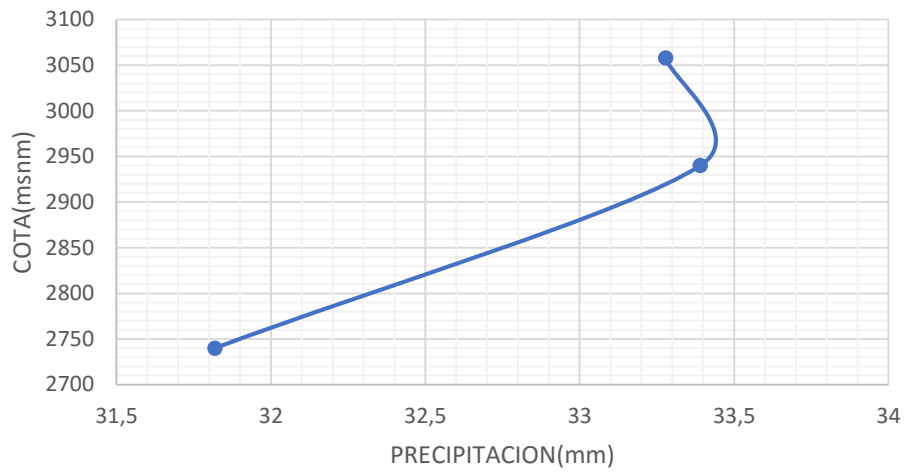
MAYO



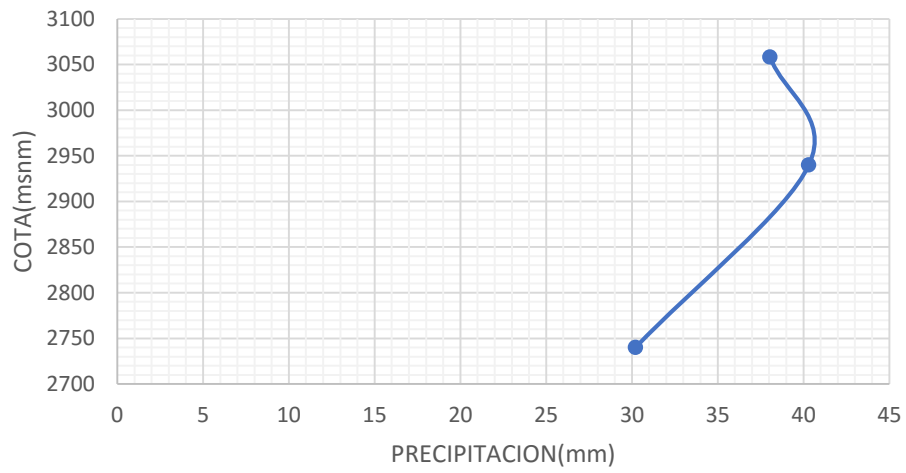
JUNIO



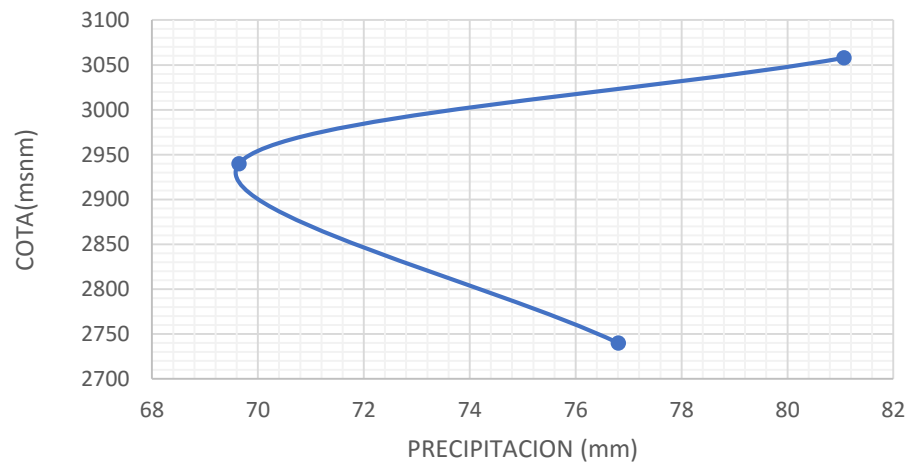
JULIO



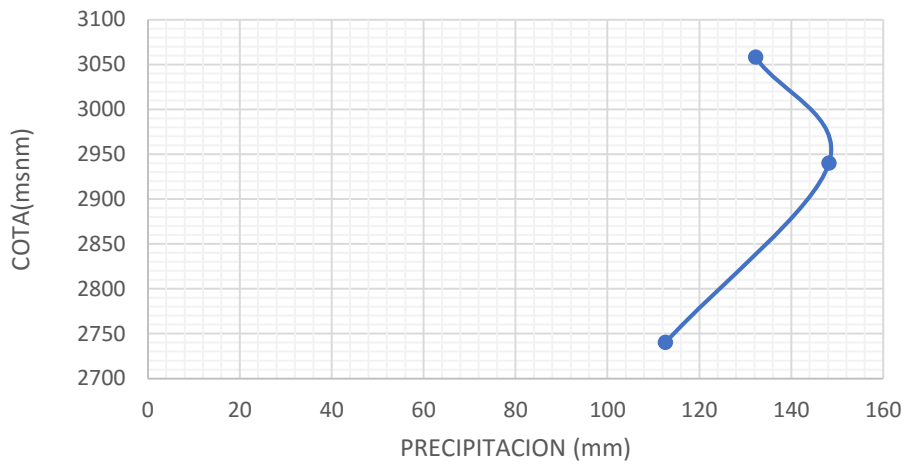
AGOSTO



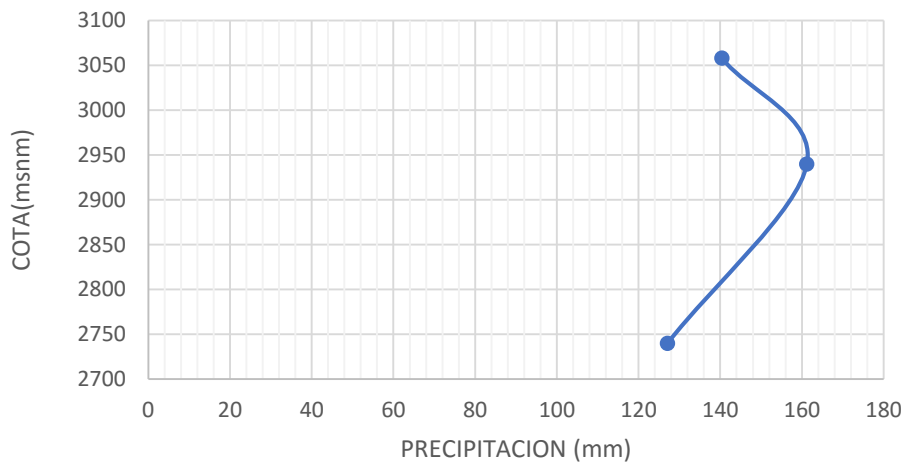
SEPTIEMBRE



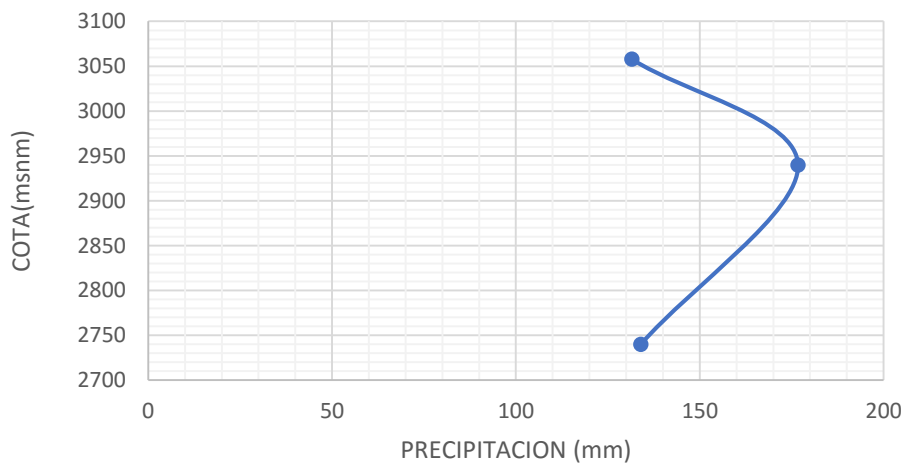
OCTUBRE



NOVIEMBRE



DICIEMBRE



Estimación de la precipitación de acuerdo a las gráficas

PRECIPITACION (mm)															
PUNTO	COTA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGT.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.	SUMA	PROMEDIO
1	2820	160	180	206	195,6	145,6	62,6	32,5	34,9	73,2	128	144	154	1516,4	126,3667
2	2840	164	187	213	196,8	144	62,8	32,68	35,8	72,3	132	148	160	1548,38	129,0317

PROFORMA DE GEOMEMBRANA DE PVC



Proforma #
PIV10224

QUITO: Av. de los Shyris N33-134 y Av. República Del Salvador. Edif Libertador Centro Corporativo, Piso 13.
Teléfono: +593 2 500 1014 Celular: +593 9 997 20031 E-mail: gerenciatec@pivaltec.com P.O.Box 17-17-359
website: www.geosinteticos.com

Felipe Buitrón C. RUC/CI: ???? QUITO	FECHA: 13-12-2017 10:19:24 SOLICITADO POR: Felipe Buitrón C. FBUITRON484@PUCE.EDU.EC DESPACHADO POR:
--	---

VÁLIDO HASTA: 13-01-2018	TIEMPO DE ENTREGA: SEGUN CRONOGRAMA DE OBRA
FORMA DE PAGO: CONTADO ANTICIPADO	
VENDEDOR: Fausto Miranda	VÍA: Terrestre
CONTRIBUYENTE ESPECIAL Resolución 636 del 29 de Diciembre del 2005	

Cantidad	Unidad	Detalle	Precio	Subtotal	% Desc.	Total Descuento	Valor Total
1,00	m ²	Geomembrana PVC Cipageo Tunel 3.00 C21 Amareto Cod (2,0m x 20 ml) <i>SE COTIZA POR M2</i>	12,95	12,95	%	0,00	12,95
		SI INCLUYE:					
		NO INCLUYE:					
		SON: SE COTIZA POR M2					
						VALOR TRANSFERENCIAS CON TARIFA CERO	0.00
						VALOR TRANSFERENCIAS CON TARIFA %IVA	12,95
						IVA	1,55
						TOTAL \$	14,50

OBSERVACIONES: COSTO DE MERCADERÍA EN BODEGAS PIVALTEC QUITO (SECTOR MARIANITAS DE CALDERON)	RECIBÍ CONFORME:	ATENTAMENTE: Fausto Miranda Gerencia Técnica
---	-------------------------	---

Favor cancelar con cheque cruzado a la orden de Pivaltec S.A.