UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**Diseño de la sección transversal mediante el método NATM en la etapa 1A
del proyecto de la Línea 2 del metro de Lima**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Martel Espinoza, Jhon Jersson (0000-0002-6652-2608)

Samaniego Carrión, Antonio Gabriel (0000-0002-8364-763X)

ASESOR:

Bragagnini Rodríguez, Iván Enrique (0000-0002-6870-1503)

Lima, 10 de junio de 2020

DEDICATORIA

A Dios.

Por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud para lograr los objetivos que nos planteamos, además de su infinita bondad y amor.

A Nuestros Padres.

Por habernos apoyado en todo momento, sus valores, por sus consejos, por la motivación constante que nos han permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A Nuestros Familiares.

A nuestros hermanos mayores por ser un ejemplo de profesional íntegro y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

A Nuestro Maestro.

Ing. Iván Bragagnini Rodríguez por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todos los profesores de la universidad donde me he formado en toda mi vida universitaria por su paciencia, dedicación, motivación, criterio y aliento. Hicieron fácil lo difícil. Ha sido un privilegio contar con su apoyo incondicional.

Gracias a todas las personas de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, por su atención y amabilidad.

Gracias a las personas que, de una manera u otra, fueron claves en mi vida universitaria siendo constantes con el apoyo que me brindaron durante toda la tesis.

RESUMEN

La tesis consiste en proponer un diseño de la sección transversal mediante el método NATM de la etapa 1A del proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima. En el cual para comenzar este estudio en este mega proyecto que en la actualidad se sigue realizando se tuvo que investigar los distintos procesos de excavación que se iban a utilizar, entre ellas tenemos al nuevo método austriaco (NATM) y las máquinas tuneladoras (TBM), sin embargo, el último método de excavación de túnel aún no ha sido utilizado. Por un lado, se identificó parte de las obras preliminares para los frentes de trabajo del NATM, las cuales vienen a ser las construcciones de estaciones, piques, túnel de interceptación, entre otras que serán mencionadas y definidas en un capítulo líneas más abajo, es muy importante esta parte, pues mediante esta información podemos saber a dónde va dirigido nuestro objetivo principal, que consiste en proponer un diseño y revestimiento en futuras construcciones de túneles urbanos en Lima.

Finalmente, para poder realizar un diseño de sostenimiento y revestimiento distinto al que ya se encuentra en proceso tuvimos que realizar distintas verificaciones, las cuales cumplieron con los requisitos de la norma del AISC 360-2011, E.060 y E.090 de Estructuras de Acero, dando así una nueva opción para el revestimiento y sostenimiento de futuras construcciones de túneles urbanos.

Palabras Claves:

NATM (Nuevo método Austriaco), TBM (Maquinas Tuneladoras), diseño de sostenimiento y revestimiento, como se construye un túnel, procesos constructivos.

Design of the cross section using the NATM method in stage 1A of the Lima Metro
Line 2 project

ABSTRACT

This thesis consists in the study of the NATM method of stage 1A of the project of Line 2 of the Lima Metro. In which to start this study in this mega project that is still being carried out, it was necessary to investigate the different excavation processes that were going to be used, among them we have the new Austrian method (NATM) and the tunneling machines (TBM) However, the last tunnel excavation method has not yet been used. On the one hand, part of the preliminary works was identified for the work fronts of the NATM, which come to be the constructions of stations, shafts, interception tunnel, among others that will be mentioned and defined in a chapter lines below, this part is very important, because through this information we can know where our main objective is directed, which is to propose a design and coating in future urban tunnel constructions in Lima.

Finally, In order to carry out a different support and coating design to the one already in process, we had to carry out different verifications, which complied with the requirements of the AISC standard 360-2011 and E.090 of Steel Structures, thus giving a new option for the coating and maintenance of future urban tunnel constructions.

Keywords:

NATM (New Austrian method), TBM (Tunneling Machines), design of support and coating, how a tunnel is built, construction processes.

ÍNDICE

Contenido

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	x
INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes.....	1
Realidad problemática	6
Formulación del problema.....	11
Hipótesis	11
Objetivo General.....	11
Objetivos Específicos	11
Descripción del contenido	12
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	13
1.1 ¿Qué se entiende por un estudio a los métodos constructivos de túneles?.....	13
1.2 Información requerida para las especificaciones de la tuneladora	13
1.3 Ventajas y desventajas de los métodos constructivos	13
1.3.1 Método NATM	13
1.3.2 Método TBM	17
1.4 Construcciones de metros a nivel internacional con método de excavación y sostenimiento NATM y TBM.....	19
1.4.1 Túnel de Bracons	19
1.4.2 Túnel del Toyo	19
1.4.3 Túnel de Pajares.....	20

1.4.4	Metro de Panamá	21
1.4.5	Metro de Raid Líneas 4, 5 y 6	21
1.4.6	Metro de Barcelona	22
1.5	Construcciones de túneles en Lima, Perú	23
1.6	Guía de Normativas de Túneles Urbanos	25
CAPÍTULO 2. MATERIAL Y MÉTODOS		28
2.1	Material.....	28
2.1.1	Población	28
2.1.1.1	Características Urbanas	28
2.1.1.2	Características físicas	30
2.1.1.3	Características Geo-Morfológicas.....	30
2.1.1.4	Características sociales.....	32
2.2	Método.....	33
2.2.1	Nivel de investigación	33
2.2.2	Diseño de Investigación.....	41
CAPÍTULO 3. EXCAVACIÓN, REVESTIMIENTO Y SOSTENIMIENTO DE TÚNELES SUBTERRÁNEOS		42
3.1	Describir los distintos procesos de excavación en proyectos de túneles subterráneos.	42
3.1.1	Métodos Convencionales de Excavación de Túneles Subterráneos.....	43
3.1.2	El uso de Tuneladoras en la Línea 2 del Metro de Lima.....	47
3.2	Describir las obras preliminares para frentes de excavación del método NATM. 51	
3.2.1	Obras Previas.....	51
3.2.2	Túnel de Interceptación	62
3.3	Describir el tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en túneles subterráneos	66
3.3.1	Sostenimiento y revestimiento: diferencias y utilidades	66

3.3.2	Tipos de Sostenimiento aplicados en túneles subterráneos	68
3.3.3	Particularidades y funciones del revestimiento estructural en túneles	69
3.3.4	Diseño del revestimiento estructural de túneles	70
CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE DISEÑO DE SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO POR LA METODOLOGÍA NATM.....		73
4.1	Fundamento	73
4.2	Estructura.....	73
4.3	Desarrollo	74
4.4	Diseño del Sostenimiento Primario y Secundario	77
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		92
5.1	Verificación de resultados	92
5.1.1	Describir los distintos procesos de excavación en proyectos de túneles subterráneos.....	92
5.1.2	Describir las obras preliminares para frentes de excavación del método NATM 95	
5.1.3	Describir el tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en túneles subterráneos.....	96
5.1.4	Proponer un diseño de sostenimiento y revestimiento por la metodología NATM, distinto al ya aplicado en la construcción del proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima.....	97
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		98
CAPÍTULO 7. RECOMENDACIONES.....		100
CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		102
ANEXO		108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de la Población Reciente y Futura	32
Tabla 2. Ventajas del Concreto Proyectado y del Concreto Convencional.....	56
Tabla 3. Costo unitario por metro lineal de túnel	57
Tabla 4. Dosificación Concreto Proyectado Vía Seca.....	59
Tabla 5. Dosificación Concreto Proyectado Vía Húmeda.....	60
Tabla 6. Contenido de finos recomendado para una mezcla para concreto proyectado.	60
Tabla 7. Dosificación de concreto para cada m ³ de acuerdo a su resistencia.	62
Tabla 8. Principales diferencias entre Sostenimiento y Revestimiento.....	68
Tabla 9. Conversión de unidades de propiedades del sostenimiento	81
Tabla 10. Solicitaciones en las conexiones sostenimiento primario	85
Tabla 11. Comparación de la implementación del método NATM y TBM.....	93

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. Proceso de construcción del método de mejora previa al terreno. Adaptado de “Underground Space”, por Kiyoshi Kishida, 2020.	4
Figura 2. Excavación 2D en túnel profundo. Adaptado de “Computers and Geotechnics”, por Plinio G.C., 2020.....	5
Figura 3. Excavación en túnel 2D discretizada con elementos fronterizos e internos celdas de dominio. Adaptado de “Computers and Geotechnics”, por Plinio G.C., 2020.....	5
Figura 4. Demanda por estaciones de la Línea 1 del Metro de lima. Adaptado de "Como vamos en movilidad", por Editorial Municipalidad de Lima, 2020.	6
Figura 5. Túnel Puruchuco en proceso de construcción. Adaptado por “Interempresas.net”, por Aldesa, 2020.	8
Figura 6. Colapso del spandrel derecho, Adaptado por “Engineering”, por Marcio Muniz, 2020.	10
Figura 7. Agrietamiento del concreto proyectado, Adaptado por “Engineering”, por Marcio Muniz, 2020.	10
Figura 8. Proceso de excavación NATM, Adaptado de “Computers and Geotechnics”, por Plinio G.C. 2020.	16
Figura 9. Túnel de Cabrera, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.	18
Figura 10. Tunel de Bracons, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020... ..	19
Figura 11. Túnel de Toyo, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.	20
Figura 12. Túnel de Pajares, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.	20
Figura 13. Metro de Panamá, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020... ..	21
Figura 14. Metro de Raid Líneas 4,5 y 6, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.	22
Figura 15. Metro de Barcelona, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.	22
Figura 16. Proyecto Vía parque Rímac. Adaptado por “Juan Arellano Valdivia – Diario Correo”, 2020.	23
Figura 17. Túnel Néstor Gambetta. Adaptado por “Juan Arellano Valdivia – Diario Correo”, 2020.	24
Figura 18. Túnel de Benavides. Adaptado por “Francisco Ortiz - América Noticias”, 2020.	25

Figura 19. Sección de túnel. Adaptado por “Ministerio de Transporte y comunicaciones”, 2020.	26
Figura 20. Primera línea de Metro Subterráneo. Adaptado de “Editorial Autoridad Autónoma del Sistema eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao”, 2020.	29
Figura 21. Mapas de suelos en los distritos de Lima. Adaptado de “Sistema Nacional de Información Ambiental”, 2020.	32
Figura 22. Vista a la Estación Santa Anita de la Línea 2 del Metro de Lima. Fuente propia, 2020.	34
Figura 23. Método de excavación (cut and over) en la estación Santa Anita de la Línea 2 del Metro de Lima. Fuente propia, 2020.	35
Figura 24. Método NATM en la construcción del túnel de la Línea 2 del Metro de Lima. Fuente propia, 2020.	35
Figura 25. Parte Frontal de la tuneladora TBM. Fuente propia, 2020.	37
Figura 26. Dovelas de la tuneladora TBM. Fuente propia, 2020.	37
Figura 27. Publicación realizada desde la cuenta oficial de Blog 360° en Concreto. Adaptado “Construcción de la línea 9 del Metro de Barcelona” por Silva J, 2020.	39
Figura 28. Línea 6 del Metro de Santiago. Adaptado de “Editorial - Administración y Transporte CI”, 2020.	40
Figura 29. Diseño de Investigación. Fuente propia, 2020.	41
Figura 30. Esquema de construcción típica de una línea de metro. Fuente propia, 2020.	43
Figura 31. Método Belga, Adaptado de "Consejería de Transportes, Infraestructura y Vivienda", por Comunidad Madrid. 2020.	44
Figura 32. Procedimiento del Método Alemán, Adaptado de "Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas", por Rubén Álvarez - Open Course Ware. 2020.	45
Figura 33. Procedimiento del Método Alemán, Adaptado de "Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas", por Rubén Álvarez - Open Course Ware. 2020.	45
Figura 34. Método Bernold, Adaptado de "Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas", por Rubén Álvarez - Open Course Ware. 2020.	46
Figura 35. Escudo EPB rompe muro de estación en el Metro de Sydney. Adaptado de “Estudio de pre-factibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	48

Figura 36. Esquema Cut and Cover modalidad Top Down. Adaptado de “Estudio de Prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante maquinas tuneladoras” por Aguilar R. 2020.	49
Figura 37. Esquema de avance de una máquina tuneladora. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	50
Figura 38. Sección circular doble vía. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	50
Figura 39. Sección circular bi-tubo, vías separadas. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM”, por Aguilar R. 2020.	51
Figura 40. Fases de excavación del pique en cuadrantes. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	53
Figura 41. Esquema de pique de construcción típico. Fases de excavación del pique en cuadrantes y maquinaria empleada. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	54
Figura 42. Geometría de las galerías de conexión de piques, Fases de excavación del pique en cuadrantes y maquinaria empleada. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	55
Figura 43. Método de avance del túnel para el uso del concreto proyectado. Adaptado de “Concreto proyectado en la construcción de túneles”, por Marcio Muniz. 2020.....	56
Figura 44. Comparación de costos por metro lineal de Túnel mediante Concreto Convencional y Concreto Proyectado, Fuente propia, 2020.	58
Figura 45. Pique de construcción y tramo de túnel interestación. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	63
Figura 46. Geometría del túnel interestación. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	64
Figura 47. Excavación de túnel por medios mecánicos. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	64

Figura 48. Sistema de evacuación de escombros mediante cintas verticales. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.	65
Figura 49. Secuencia constructiva del método NATM. Fuente propia, 2020.	78
Figura 50. Diagrama de Momento Flector. Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020	79
Figura 51. Diagrama de Fuerza Cortante. Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020.	80
Figura 52. Diagrama de Fuerza Normal. Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” Chirinos. 2020.	81
Figura 53. Dimensiones de la sección armada, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020. ...	82
Figura 54. Verificación por Pandeo Compresión Axial, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.	83
Figura 55. Verificación por Flexión Amplificada, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.	84
Figura 56. Verificación por Corte, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.	85
Figura 57. Diseño de la sección. Fuente propia, 2020.	86
Figura 58. Diseño de diámetros de pernos, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.	86
Figura 59. Diseño de espesor de platina A36, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.	87
Figura 60. Resistencia al corte de platina, hoja cálculo. Fuente propia, 2020.	87
Figura 61. Verificación de la resistencia al corte en pernos, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.	88
Figura 62. Diseño de celosía simple, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.	89
Figura 63. Diagrama de Fuerzas Axiales Revestimiento Secundario, Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020.	89
Figura 64. Diagrama de Fuerzas Cortantes Revestimiento Secundario, Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020.	90
Figura 65. Diagrama de Momento Flector Revestimiento Secundario, Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020.	90

Figura 66. Verificación por Flexión., hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.....	91
Figura 67. Verificación por cortante, hoja cálculo. Fuente propia, 2020.....	92
Figura 68. Colocación de sostenimiento primario. Fuente propia, 2020.....	108
Figura 69. Colocación de Celosía y Platina. Fuente propia, 2020.	109
Figura 70. Vista del recubrimiento y sostenimiento secundario. Fuente propia, 2020.	110
Figura 71. Muestra del Sostenimiento y Revestimiento utilizado en la Línea 2 del Metro de Lima. Fuente propia, 2020.....	111

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El diseño y la construcción de túneles modernos requieren técnicas y tecnologías apropiadas durante todas las fases de un proyecto de túnel. Seleccionar un procedimiento de excavación adecuado para proyectos de túneles urbanos de gran envergadura en terreno blando es un factor clave para la construcción exitosa del proyecto. Los costos y el tiempo para la construcción del túnel están fuertemente influenciados por la elección del procedimiento de excavación, para esto las siguientes investigaciones brindarán información de los métodos constructivos que existen para la construcción de túneles.

En el paper titulado “Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations”, por Muniz. M, Moraes. A y Pacheco. A (2015) mencionan lo siguiente El alto costo del espacio urbano ha aumentado significativamente la demanda de túneles en los grandes centros urbanos. En dichas áreas, los asentamientos inducidos por la excavación del túnel pueden causar daños graves a las estructuras cercanas. Por lo tanto, es necesario investigar medios efectivos para controlar los asentamientos inducidos por túneles. En muchos países, los túneles en suelos y rocas se construyen utilizando el Nuevo Método de Túneles de Austria (NATM). Esto se debe principalmente a su flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones del suelo y al uso de equipos simples. Los diseños de túneles de NATM generalmente se basan en métodos empíricos que tienen en cuenta las experiencias locales. Se dice que el método es observacional y que el proceso de construcción puede cambiar de acuerdo a los resultados que se observen con la masa de la tierra, la cual se adquiere por medio de la instrumentación adecuada. Los desplazamientos inducidos se controlan empíricamente ajustando la velocidad de excavación, distancia entre la cara del túnel y el soporte, excavación de cara parcial y cierre de invertido. Por otro lado, en el paper “Discussion on the mechanism of ground improvement method at the excavation of shallow overburden tunnel in difficult ground”, por Kishida. k, Ying. C, Nonomura. M, Iura. T y Kimura, afirman que recientemente, el Nuevo Método de Túnel Austríaco (NATM), ha ido en aumento. En el campo de la construcción, este método se utiliza para excavar un túnel de sobrecarga poco profundo en suelo blando, se aplica un método auxiliar, como el calado de la tubería o el pre refuerzo vertical, en el sitio de construcción del túnel y luego se lleva a cabo la estabilización de la corona y la prevención del asentamiento de la superficie del suelo.

Además, Se han empleado varios métodos auxiliares de tunelización para evitar tanto el colapso de la cara de excavación del túnel como el asentamiento en la superficie y la corona del

túnel. Cuando se emplea un método auxiliar, se debe explorar la manejabilidad y la estabilidad de la excavación del túnel, y se debe elegir un método auxiliar adecuado. Miwa y Ogasawara (2005) abordaron la excavación de túneles de tren bala que cruzaban bajo una carretera nacional con una capa superficial. Informaron que se habían propuesto y discutido cuatro métodos de excavación y que el NATM con el método de prefiltración de tubería de lechada fue seleccionado considerando la seguridad, el plazo de construcción y los costos de construcción. Como resultado, se evitó que la cara colapsara, y el túnel fue excavado mientras se mantenía el asentamiento de la superficie del suelo al mínimo y se evitaba la interferencia con el tránsito. Sin embargo, el mecanismo efectivo del método de inyección de tubería tipo lechada en esta aplicación no se discutió.

Así mismo, varios trabajos de investigación anteriores han discutido las ventajas de la excavación estable en túneles y los mecanismos de métodos auxiliares. Como los túneles a menudo son conducidos a través de un suelo blando que contiene aguas subterráneas y en lugares cercanos a varias utilidades y estructuras, Kimura, Ito, Iwata y Fujimoto (2005) aplicaron dos métodos: a saber, inyección de chorro especial para pilas de pie y tubería larga de acero para prevenir el desplazamiento, y un método de perforación para el drenaje de aguas subterráneas. Oke, Valchopoulos, y Marinos (2014) analizaron informes de literatura y construcción y discutieron el efecto del arco sombrilla (UA) clasificando tres tipos de elementos de soporte: spiles, mástiles y grouted. Yoo (2002) investigó el comportamiento de una cara de túnel reforzada por tuberías longitudinales utilizando un análisis de elementos finitos tridimensionales. Sobre la base de los resultados numéricos, concluyó que la técnica de refuerzo facial utilizando tubos longitudinales podría reducir significativamente la deformación de la cara y mejorar así su estabilidad. Kamata y Mashimo (2003) investigaron los efectos de varios métodos auxiliares, tales como el atornillado frontal, el atornillado vertical y el preenfoque vertical, mediante pruebas de modelado centrífugo en suelo arenoso y la simulación numérica con DEM. Identificaron varios efectos favorables en términos de estabilidad facial. Taguchi et al. (2000) llevaron a cabo pruebas modelo y de tamaño completo en un pre-revestimiento delgado y flexible. Concluyeron que el pre-revestimiento fue efectivo tanto para la estabilidad de la cara y la prevención del asentamiento de la superficie del suelo. También propusieron un método de estimación cuantitativa para la estabilidad de la cara. Kitagawa et al. (2009) realizaron experimentos de trampas y una simulación numérica para determinar el efecto de una reducción del asentamiento y el mecanismo correspondiente utilizando una pila lateral de refuerzo de pie de túnel. Cui, Kishida y Kimura (2008) realizaron una simulación numérica de una excavación de túnel y una pila lateral con el objetivo de evitar el asentamiento superficial de la capa superficial y el suelo blando.

Con base en la simulación numérica, propusieron que la prevención del asentamiento de la superficie del suelo y el asentamiento del túnel, mediante la instalación de un pilote lateral de refuerzo de pie, afecta el refuerzo de cortante, la redistribución de la carga y la presión interna. También aconsejaron que la pila lateral de refuerzo de pie se debe instalar a través de la zona de corte durante la excavación del túnel.

Varios túneles construidos para el tren balan Tohoku en Japón, el llamado ferrocarril Tohoku Shinkansen, entre Hachinohe y Shichinohe-Towada, se construyeron bajo la condición de una capa superficial y suelo blando. En casos sin ningún obstáculo en la superficie del suelo, la base objetiva se mejoró utilizando el método de estabilización de mezcla superficial o profunda. Luego, el túnel fue excavado por NATM. Este enfoque constituye el método de mejora del suelo de la excavación de un túnel de sobrecarga poco profunda. La Fig. 1 muestra el proceso de construcción asociado con este método. Primero, el suelo se excava en la parte superior de la corona del túnel. Entonces, el cemento se mezcla con el suelo natural alrededor de la pared lateral del túnel utilizando el método de estabilización de mezcla superficial o profunda. El suelo premezclado se extiende y se compacta enrollando sobre el área de la corona del túnel. Finalmente, la tierra excavada se rellena y se compacta enrollándola sobre la superficie del suelo. El túnel puede ser excavado usando NATM. Se implementaron varias combinaciones de áreas mejoradas y niveles de resistencia del suelo mejorado en el campo, y los túneles fueron excavados con éxito. El método de mejora del suelo se empleó después de considerar las condiciones de la sobrecarga, la geología, la superficie del terreno, el asentamiento permitido, y los datos de varios proyectos de construcción previamente reportados (Kitagawa, Isogai, Okutsu, y Kawaguchi, 2004; Nonomura, Iura, Okajima, y Kishida, 2011; Saito, Ishiyama, Tano, y Haga, 2011; Tadenuma, Isogai, Konishi, Nishiyama y Okutsu, 2003). En este estudio, se llevan a cabo experimentos con trampas tridimensionales (3D) para simular el progreso de una excavación de túnel. En los experimentos con trampas, el proceso de tunelización se simula bajando las placas de soporte (trampillas) para reducir el estrés de confinamiento en áreas localizadas (Adachi, Kimura y Kishida, 2003; Murayama y Matsuoka, 1971; Ono y Manai, 1938). Nakai, Xu y Yamazaki (1997) realizaron pruebas con modelos de trampilla 3D, utilizando un aparato de trampilla continua, para investigar el efecto 3D y el efecto dilatativo sobre los movimientos del terreno que se producen durante la excavación del túnel. Cui et al. (2008) llevaron a cabo una serie de experimentos modelo utilizando el aparato de trampilla para aclarar el efecto de la pila lateral de refuerzo de pie.

Figura 1. Proceso de construcción del método de mejora previa al terreno. Adaptado de “Underground Space”, por Kiyoshi Kishida, 2020.

Por ultimo en el paper “Nonlinear analysis of NATM tunnel construction with the boundary element method”, por Plínio.G, Thoeni. K y Beer. G, mencionan que un enfoque novedoso para la simulación de la construcción de túneles NATM utilizando el método del elemento de contorno (BEM). Este nuevo enfoque tiene la ventaja de que solo deben discretizar la superficie de excavación, las posibles zonas de plástico y el revestimiento del túnel. Toda la masa rocosa está representada por el BEM, mientras que el Método de elementos finitos (FEM) se utiliza para representar el revestimiento del túnel solamente. Por lo tanto, se presenta una estrategia de acoplamiento general para acoplar elementos de contorno tridimensionales con elementos finitos del armazón (concreto proyectado) y elementos finitos del haz (arcos de acero) como se muestra en la Figura 2 y 3. Para lograr resultados realistas, se considera el efecto de la hidratación del hormigón proyectado y el rendimiento de los arcos de acero en el proceso de excavación, Además, el comportamiento de roca no lineal se modela de forma más realista mediante el uso de un poderoso modelo constitutivo jerárquico que considera una amplia gama de materiales de roca. La combinación de estas ideas da como resultado una mayor facilidad de uso y eficiencia. Se presentan algunas pruebas de verificación y aplicaciones prácticas en túneles.

Figura 2. Excavación 2D en túnel profundo. Adaptado de "Computers and Geotechnics", por Plinio G.C., 2020.

Figura 3. Excavación en túnel 2D discretizada con elementos fronterizos e internos celdas de dominio. Adaptado de "Computers and Geotechnics", por Plinio G.C., 2020

Realidad problemática

- Alta demanda de usuarios.

En la actualidad el Perú concentra mayor parte de su población en su capital (Lima), esto conlleva a que las personas exijan más medios de transporte para poder movilizarse de un lugar a otro, en su inicio se planteó y se construyó la Línea 1 del Metro de Lima, pero esto también provocó congestión en las estaciones, por parte de los usuarios y por los vehículos externos.

Luego de la ampliación de la Línea 1 a mediados del 2014, este servicio pasó a tener 26 estaciones que van desde Villa El Salvador hasta San Juan de Lurigancho. Las estaciones con mayor demanda de usuarios durante el 2015 fueron Gamarra (9.8%), Miguel Grau (9%) y Bayóvar (7.2%) como se muestra en la Figura 4. Cabe mencionar que en el 2014 Villa El Salvador figuraba como la tercera estación con mayor demanda, sin embargo, con la ampliación del tramo del metro, está ahora ocupa el cuarto lugar en demanda (Como Vamos Lima, 2015)

ESTACIÓN	DEMANDA	% DEMANDA
Gamarra	10'479,118	9.8
Miguel Grau	9'618,565	9.0
La Cultura	9'238,772	8.6
Bayóvar	7'686,692	7.2
Villa El Salvador	7'205,132	6.7
Angamos	5'459,072	5.1
Villa María	4'269,597	4.0
Atocongo	4'045,818	3.8
Santa Rosa	3'892,501	3.6
Cabitos	3'852,283	3.6
Arriola	3'851,177	3.6
Los Jardines	3'752,706	3.5
San Carlos	3'680,161	3.4
María Auxiliadora	3'519,315	3.3
San Juan	3'370,050	3.1
San Martín	3'063,845	2.9
Caja De Agua	2'883,624	2.7
Pirámides Del Sol	2'696,178	2.5
Los Postes	2'680,842	2.5
Parque Industrial	2'415,577	2.3
San Borja Sur	2'297,013	2.1
Ayacucho	2'226,166	2.1
Pumacahua	2'149,679	2.0
Jorge Chávez	1'705,850	1.6
Presbítero Maestro	673,036	0.6
El Ángel	357,376	0.3

Figura 4. Demanda por estaciones de la Línea 1 del Metro de Lima. Adaptado de "Como vamos en movilidad", por Editorial Municipalidad de Lima, 2020.

Esto quiere decir que Lima presenta problemas por la demanda de usuarios en el tema del transporte, generando tráfico, es por eso que el plan de la Línea 2 del Metro de Lima es mitigar el problema donde se centra en disminuir el congestionamiento haciendo las estaciones subterráneas sean más eficiente en el traslado de los usuarios.

- Limitado uso de métodos constructivos para túneles.

Para esta construcción de la Línea 2 del Metro de Lima, existen muchas limitantes, una de ellas es que en el país no se ha visto muchas construcciones de túneles y mucho menos de tal envergadura en la cual se conectarán muchos distritos, existe una empresa en la cual ya se está implementando con temas de construcción de túneles, pero por los escasos estudios en el país sobre túneles se le fue difícil poder hacer la obra que se encuentra ubicada en el distrito de Ate, llamado el Túnel Puruchuco. Al respecto Aguilar R. (2017) señala que:

El Proyecto de los Túneles de Puruchuco y Accesos consiste en la construcción de dos túneles viales paralelos urbanos, de unos 70 m de longitud y con una sección de excavación de 119 m², denominados Túnel Puruchuco Norte y Sur. Los túneles proyectados se ubican en el Cerro Mayorazgo, y servirán para interconectar la circulación del tráfico vehicular entre las Avenidas Javier Prado con Nicolás Ayllón en el distrito de Ate, provincia y Región de Lima.

Lima presenta construcciones de túneles, pero no de alta proporción en la cual se emplean métodos básicos para su construcción como se muestra en la Figura 5, a comparación del proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima existen varias incertidumbres, ya que abarca muchos kilómetros de trabajos en donde cada avance surgirán más cuestionamiento como por ejemplo el tipo de suelo, asentamientos y como poder solucionarlos.

Figura 5. Túnel Puruchuco en proceso de construcción. Adaptado por “Interempresas.net”, por Aldesa, 2020.

- Elevados tiempos de traslados entre distritos.

En la actualidad, Lima presenta un gran problema con el tráfico generado por vehículos privados y públicos donde esto genera incomodidad con el usuario.

Según el Colegio de Ingeniero del Perú (2012), la población de Lima invierte una cuarta parte de su vida viajando en un transporte público con vehículos en mal estado generando una infraestructura vial insuficiente, por lo que se requieren sistemas eficientes como el metro subterráneo (Línea 2). Juan Fernán Muñoz Rodríguez, Decano Nacional del Colegio de Ingenieros (2010 – 2012), señaló que el Perú tiene un atraso de más de 100 años en materia de transporte ferroviario, por lo que es fundamental adaptarse por la ejecución, sin interrupciones, de proyectos como el Tren Eléctrico. Afirmó que los habitantes ocupan aproximadamente entre 4 a 5 horas a bordo de un bus, coaster o combi para ir a su trabajo o centro de estudios y retornar a casa.

- Accidentes por asentamientos en la superficie.

De acuerdo con el conocimiento del suelo de Lima es muy probable que existan muchas dificultades en la fase de construcción del túnel, ya que pueda provocar alguna deformación en las áreas de la superficie del túnel. En las construcciones de túneles que implican sobrecargas superficiales en terrenos difíciles (por ejemplo, terrenos blandos, no consolidados) han aumentado en Japón. El método de mejora del suelo, que es uno de los métodos auxiliares para túneles de sobrecarga poco profundos, ha demostrado su capacidad para controlar de manera efectiva la cantidad de asentamiento bajo suelo blando. Sin embargo, el mecanismo del método de mejora

del suelo no ha sido aclarado, ni se ha establecido un código de diseño adecuado para ello. Por lo tanto, debido a que la fuerza del terreno mejorado y la longitud y el ancho adecuados del área mejorada no se han entendido completamente, se ha aplicado un diseño empírico en todos los casos.

Por otro lado, cuando se excava un túnel con una sobrecarga poco profunda en un terreno difícil (por ejemplo, blando, no consolidado), la estabilidad y la seguridad de la cara de excavación del túnel es motivo de preocupación. Particularmente en el caso de suelo blando, el suelo que se suelta por la excavación tiende a expandirse en el terreno circundante. Además de la sobrecarga poco profunda, la excavación también tiene un efecto directo en la superficie del suelo sobre el túnel. Por lo tanto, el control de la tierra suelta es el problema técnico más importante en la excavación de un túnel ubicado bajo una capa superficial en suelo blando. Esto quiere decir que no solo es importante preocuparse por la sección del túnel que se requiera construir, sino también del área en la cual va estar por encima del túnel para que no provoque asentamientos en esa área.

- Desprendimiento del perímetro circular.

El Nuevo Método de Túneles Austríacos (NATM) se ha utilizado ampliamente en la construcción de túneles de montaña, líneas de metro urbano, tanques de almacenamiento subterráneo, centrales eléctricas subterráneas, carreteras mineras, etc. Los patrones de variación de los datos de predicción geológica avanzada, los datos de tensión y esfuerzo de las estructuras de soporte y los datos de deformación de la roca circundante son de vital importancia para evaluar la racionalidad y fiabilidad de los esquemas de construcción, proporcionando información esencial para garantizar la seguridad. Sin embargo, a medida que la cantidad de estos datos aumenta significativamente, la incertidumbre y la discreción de los datos de masa hacen que sea extremadamente difícil producir un esquema de construcción razonable; también reducen la precisión del pronóstico de accidentes y situaciones peligrosas, creando enormes desafíos en la seguridad de la construcción de túneles como se muestra en las Figuras 6-7.

Figura 6. Colapso del spandrel derecho, Adaptado por “Engineering”, por Marcio Muniz, 2020.

Figura 7. Agrietamiento del concreto proyectado, Adaptado por “Engineering”, por Marcio Muniz, 2020.

Formulación del problema

¿La propuesta de sostenimiento y revestimiento por la metodología NATM será una alternativa en futuras construcciones de túneles urbanos en Lima como en el proyecto de la Línea 2 del metro de Lima?

Hipótesis

La propuesta de sostenimiento y revestimiento es una alternativa para futuros túneles urbanos subterráneos similares al proyecto de la línea 2 del metro de Lima.

Objetivo General

- Presentar la propuesta de un diseño de sostenimiento y revestimiento por la metodología NATM para futuras construcciones de túneles urbanos en Lima.

Objetivos Específicos

- Describir los distintos procesos de excavación en proyectos de túneles subterráneos.
- Describir las obras preliminares para frentes de excavación del método NATM.
- Describir el tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en túneles subterráneos.

Descripción del contenido

Este estudio consiste en proponer un sostenimiento y revestimiento, el cual será una alternativa para la excavación de futuros túneles urbanos subterráneos mediante la utilización del método NATM como modelo de aplicación en el proceso constructivo de túneles en Lima Metropolitana y a su vez poder identificar el diseño más adecuado y óptimo para cada tramo de los futuros túneles subterráneos.

Para lo mencionado líneas anteriores se identificó los alcances del NATM (Nuevo Método Austriaco), basados en:

- Distintos procesos de excavación de túneles subterráneos.
- Las obras preliminares del frente de trabajos en el proceso NATM.
- Identificar el tipo de sostenimiento y revestimiento utilizado en el proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima.

La propuesta de esta tesis, la cual presenta un análisis de diseño con sus procedimientos, fueron basados con la información del manual “Steel Desing” de William T. Segui, en donde los resultados finales cumplen cada uno de ellos con los criterios del manual de estructuras del AISC, que además se han verificado con hojas de cálculos propias.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo hablaremos de las ventajas y desventajas de los métodos del NATM y TBM, la información requerida para el uso de tuneladoras, construcción de túneles en el Perú, la guía de normas de túneles urbanos y el significado de un análisis de los métodos constructivos de túneles. Los mismos que serán de ayuda para el desarrollo de los objetivos planteados en esta tesis.

1.1 ¿Qué se entiende por un estudio a los métodos constructivos de túneles?

Antes que nada, se debe tener en cuenta que es muy necesario indicar que los túneles o excavaciones subterráneas en suelos son totalmente diferentes a túneles en roca, puesto que los problemas y métodos para resolver la ejecución son muy distintos. Esto también sucede entre construcciones en zonas urbanas o en campo abierto, todas estas incertidumbres se presentan en la construcción de la Línea 2 del Metro de Lima, en donde se debió tener un buen estudio para poder determinar que métodos son los adecuados para la construcción de túneles que unirán estación por estación, estos métodos fueron el NATM y tuneladoras TBM, ya que Lima presenta una variedad en su tipo de suelo y también por tener muy buenos resultados en proyectos similares en otros países.

1.2 Información requerida para las especificaciones de la tuneladora

Dentro de la información necesaria para definir las especificaciones y requerimientos para garantizar el uso de una tuneladora adecuada para un proyecto en particular, se deben considerar las siguientes:

- Geología del terreno a excavar
- Trazado del proyecto (tanto perfil vertical como horizontal)
- Restricciones del sitio de trabajo
- Conocimiento y experiencia local
- Disponibilidad de aditivos y costos
- Sensibilidad del comprador al costo total

1.3 Ventajas y desventajas de los métodos constructivos

1.3.1 Método NATM

El método NATM fue desarrollado después de la Segunda Guerra mundial por los austriacos Muller, Rabcewicz y Pacher en 1950. Aguilar (2017) afirma: “Es un método semi empírico para la construcción de túneles que se ha desarrollado a través del tiempo. Así mismo, Cuenta con

una amplia literatura y antecedentes históricos de las innovaciones que implementaron varios pioneros en este método”. Por otro lado, este método es también conocido con el nombre de Sprayed Concrete Lining (SCL). Aunque, este último tiene un enfoque más general debido a que no necesariamente sigue los principios del NATM, pero usa concreto proyectado como sostenimiento.

La principal característica del NATM es su excelente flexibilidad de aplicación en las diferentes condiciones de suelo, la cual obtiene prestigio a diferencia de los otros métodos convencionales para túneles. Este método ha sido usado exitosamente para su aplicación tanto en zonas rurales como urbanas.

En lugar de enfrentar la sobrecarga del terreno circundante con un recubrimiento muy grueso, este nuevo enfoque soluciona las dificultades con las presiones en roca circundante a la sección, permite que la roca se deforme y alivie esfuerzos acumulados, logrando integrar el terreno circundante como un soporte de arco de tierra que brinda sostenimiento inicial. (Aguilar, 2017)

Según Muller, Rabcewicz y Parcher el NATM es como un método de soporte para estabilizar el perímetro del túnel con el sostenimiento de distinta rigidez y el monitoreo de control de estabilidad del terreno circundante. Es un diseño óptimo que armoniza las consideraciones estructurales, geotécnicas y constructivas del túnel.

En esta definición del NATM es alimentada por una guía o filosofía que envuelve los conceptos de:

- Sostenimiento por concreto proyectado.
- Sostenimiento por anclaje sistemático si se requiere.
- Usar mediciones para controlar la efectividad del soporte.
- Un enfoque flexible aplicado es estas mediciones, incrementando o reduciendo el soporte acorde a las concisiones geológicas.

A partir de este estudio se desarrollaron veintidós principios fundamentales, siendo 15 los más importantes:

1. El suelo ofrece un apoyo principal al túnel excavado y el concreto proyectado solo tiene una fusión de apoyo secundario.
2. Se debe conservar la fuerza original del suelo, por lo que se debe tener cuidado con el aflojamiento excesivo del suelo para evitar el deterioro de su resistencia.

3. El soporte no debe asentarse demasiado pronto ni demasiado tarde, tampoco debe ser demasiado regido ni demasiado débil.
4. El acoplamiento para la transferencia de fuerzas entre el recubrimiento y el suelo, así como la instalación de soporte en el momento adecuado es esencial para garantizar el éxito del NATM.
5. La elección del soporte y la secuencia de construcción de la sección transversal se hace en base al control de desplazamiento del suelo.
6. El método usa un recubrimiento delgado de concreto proyectado para asegurar el sostenimiento inicial.
7. El aumento del soporte no se consigue con el recubrimiento más grueso de concreto proyectado, sino con el uso de soportes adicionales como acero de refuerzo, cerchas y anclajes.
8. La instalación de una bóveda estructural terminada brinda el acero de suelo la fusión estructural de un anillo cerrado que soporta cargas.
9. El diseño del NATM para suelo blando se debe enfatizar en el cierre del anillo en el mínimo tiempo relacionado con el lapso efectivo sin soporte del terreno.
10. El NATM asume que el terreno alrededor del túnel cuenta con un lapso efectivo sin soporte del terreno, aunque este puede ser mejorado con medidas artificiales como inyección de congelación.
11. La excavación a sección total se debe hacer cuando sea posible realizar por condiciones geológicas.
12. La secuencia de excavación es importante para la estabilidad general, previene las perturbaciones de micro y macro movimientos de la tierra y conserva la presión inherente del suelo.
13. Mantener una forma redondeada para la sección transversal del túnel, esto ayuda a evitar el aflojamiento del terreno y reducir la carga impuesta en el recubrimiento.
14. Cuanto menor sea la zona de aflojamiento, menor será las cargas y la cantidad real de deformación y asentamiento superficial.
15. El recubrimiento interior o exterior debe de ser delgado. Debe tener un acoplamiento de transferencia de fuerzas con el concreto proyectado, pero no un acoplamiento de transferencia de fricción. Esta puede darse cuando se aplica una membrana impermeabilizante que contiene burbujas entre el recubrimiento exterior e interior.

Puede que no existan las verdades absolutas, pero en cuestiones relacionadas con el terreno y la geotecnia, “lo barato sale caro” se aproxima mucho a aceptar la oferta más barata sabiendo

que no es la opción correcta no es ético, y menos todavía en suelos blandos en entornos urbanos, en los que tanto el riesgo como los posibles daños son muy elevados.

1.3.1.1 Procesos de excavación

El método consiste en la excavación a sección completa o parcial y un inmediato sostenimiento primario de concreto proyectado con una malla, y la colocación de bulones como elementos de sujeción de cuñas y cerchas metálicas de sujeción, si son necesarias. El avance se puede realizar a sección completa o parcial, esto depende de la estabilidad que presente la condición del suelo. Se emplea un recubrimiento débil cuando se tiene un rango de trabajo entre estable y desmesurarlo, y se puede realizar una excavación por voladura o máquinas excavadoras como se aprecia en la Figura 8. Cuando se encuentra en el rango de desmesurarlo a comprensible se usa recubrimiento más grueso, se realiza por máquinas excavadoras o escudos.

Figura 8. Proceso de excavación NATM, Adaptado de “Computers and Geotechnics”, por Plinio G.C. 2020.

1.3.1.2 Ventajas

- Es económico, un revestimiento flexible casi siempre es más barato que uno rígido.
- Altera poco el terreno, lo cual viene bien a largo plazo.
- Avances promedios de 1.8 m por día.
- Flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones del suelo.

1.3.1.3 Desventajas

- Tener un conocimiento adecuado, una supervisión continua y cuidadosa, en este caso se excluyen a los suelos blandos.
- Los rendimientos de trabajo son muy bajos comparados con las tuneladoras.

- La ocurrencia de un suelo saturado hace que el método se vea inadecuado en su aplicación.

1.3.2 Método TBM

Máquinas Tuneladoras (TBM):

Son máquinas integrales que cuentan con una cabeza de corte capaz de excavar a sección completa un túnel. Por ello, se menciona que las maquinas TBM (Tunnel Boring Machine) existen en un rango variable de diámetros, desde menores a 1m usado en máquinas microtuneladoras, llegando hasta 19 metros actualmente (Chapman, Metje & Stark, 2010). Así mismo, existen dos tipos de tuneladoras, las cuales se dividen en tuneladora topo que se caracterizan por trabajar en roca y tuneladora escudo la cual trabajan en suelo, para este proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima se emplearán dos tuneladoras las cuales trabajarán en tramos del distrito del Callao, estas tuneladoras que trabajarán en el distrito ya antes mencionado serán de tipo doble escudo

TBM Tipo Doble Escudo:

Esta tuneladora es capaz de trabajar como topo o como escudo, de acuerdo al tipo de suelo en la cual se esté trabajando, siendo esta la mejor solución para un suelo con tipología variable. La tuneladora de doble escudo está dividido en dos partes, la primera parte es la delantera la cual se encuentra la cabeza de corte y la segunda, la zona trasera donde se realiza el montaje del anillo de dovelas (material de sostenimiento).

1.3.2.1 Procesos de excavación doble escudo

Como ya se sabe este tipo de tuneladora presenta dos partes las cuales trabajan independientemente, situándose los grippers en un hueco abierto entre ambas secciones, por lo que la cabeza puede excavar mientras que, en la parte de atrás, la cola del escudo se va montando los anillos de dovelas. Esta manera los rendimientos alcanzados con este sistema son mayores que con una tuneladora de escudo simple. Este sistema se aplica en aquellos terrenos capaces de resistir la presión que transmiten los grippers. Al mismo tiempo que los cilindros de empuje principal impulsan hacia delante el escudo de la cabeza y la rueda de corte van realizando la excavación, en el escudo trasero se procede al montaje de un nuevo anillo de dovelas de sostenimiento al abrigo del mismo.

Cuando el terreno es más débil y no es capaz de resistir la presión de los grippers, la tuneladora funciona como escudo simple, cerrándose el hueco de los grippers, y apoyándose la tuneladora, mediante unos cilindros auxiliares, en el último anillo colocado, para así obtener la reacción

necesaria para el empuje de la cabeza de corte (es decir, como trabaja un escudo normal). Por ello, trabajando en modo escudo, no es posible simultanear la excavación con el montaje del anillo de dovelas.

En la Figura 9 se muestra el Túnel de Cabrera junto con la tuneladora de doble escudo en la cual se muestra el escudo delantero que sirve como estructura de soporte de la cabeza de corte, contiene el rodamiento principal, la corona de accionamiento y los sellos internos y externos.

Figura 9. Túnel de Cabrera, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.

1.3.2.2 Ventajas

- Los rendimientos de las tuneladoras suelen ser elevados.
- Extrae 1600 m³ de tierra por día.
- Coloca 12 anillos de concreto prefabricado por día.
- Reemplaza a 2400 horas de operarios por día.

1.3.2.3 Desventajas

- Disponibilidad de energía, la cual para la operación de esta tuneladora implica el tendido de líneas de alta tensión (22KV)
- Disponibilidad de personal calificado, para la operación de esta máquina se necesita una alta especialización y experiencia, no cualquiera puede manipularlo.
- Para poder comenzar a usar la tuneladora se requiere realizar con el sistema convencional de perforación y voladura, a fin de prevenir zonas intemperizadas o fallas cercanas a la superficie (proporcionar el apoyo inicial a los grippers).

1.4 Construcciones de metros a nivel internacional con método de excavación y sostenimiento NATM y TBM

1.4.1 Túnel de Bracons

El túnel está situado en el tramo Torrello – La Vall d’ en Bas de la nueva carretera Vic – Olot (Barcelona), cuenta con una longitud total de 4.57 kilómetros.

El procedimiento constructivo que se empleó fue el NATM, excavándose el túnel a sección completa y empleando un sostenimiento con cerchas, bulones y concreto proyectado. La construcción de este túnel fue una pieza clave en el eje viario Vic – Olot, ya que se redujo el tiempo de traslado de personas de un lugar a otro. En la Figura 10, se muestra parte del Túnel de Bracons.

Figura 10. Tunel de Bracons, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.

1.4.2 Túnel del Toyo

El túnel está ubicado entre los municipios de Giraldo y Cañasgordas (Colombia), este túnel forma parte de la Autopista del Mar que conecta a Medellín con el puerto de Urabá. Este presenta una longitud de 9.84 kilómetros, la cual es el más largo de los ocho túneles previstos para atravesar la cordillera occidental de Antioquia.

Su excavación fue realizada mediante el NATM, ya que este método brindaba un mayor avance y seguridad de acuerdo al tipo de suelo que presentaba Antioquia. En la Figura 11, se muestra parte del proceso de construcción del Túnel de Toyo.

Figura 11. Túnel de Toyo, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.

1.4.3 Túnel de Pajares

Este túnel forma parte del proyecto de la línea de alta velocidad de León de Asturias en el país de España. Este proyecto consistió en la ejecución de dos túneles con una longitud de 24.6 kilómetros cada uno.

El trazado total de su longitud del túnel fue realizado con dos tuneladoras de escudo simple articulado, el cual ha significado un gran reto de ingeniería técnica y constructiva. En la Figura 12, se muestra parte del Túnel de Pajares.

Figura 12. Túnel de Pajares, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.

1.4.4 Metro de Panamá

Este metro es reconocido por ser el primero en Centroamérica, el cual benefició a más de un millón de usuarios.

La línea 1 del metro de Panamá recorre del norte al sur la capital del país y une el centro de la ciudad con los barrios suburbanos de la zona este. Presenta un total de 15.9 kilómetros de distancia con 14 estaciones en toda su extensión (6 estaciones elevadas, 7 subterráneas y 1 semi-enterrada). Los tramos subterráneos del metro fueron ejecutados mediante 2 tuneladoras tipo EPB. En la Figura 13, se muestra una de las estaciones que forma parte del Metro de Panamá.

Figura 13. Metro de Panamá, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.

1.4.5 Metro de Raid Líneas 4, 5 y 6

El metro se encuentra ubicado en Arabia Saudita, consta de 64 kilómetros de longitud de los cuales 21 kilómetros son subterráneos. El método utilizado para la Línea 4 y 6 en las excavaciones subterráneas fueron Cut & Cover, sin embargo para la Línea 5 se utilizaron las TBM para un tramo de 13.7 kilómetros. En la Figura 14, se muestra la TBM en pleno proceso de excavación del Metro de Raid Líneas 4,5 y 6.

Figura 14. Metro de Raid Líneas 4,5 y 6, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.

1.4.6 Metro de Barcelona

Este metro presenta una longitud de 4.29 kilómetros, el cual conecta el Barrio de Bon Pastor con Oliveres, fue ejecutado mediante una tuneladora tipo EPB, capaz de trabajar en modo abierto y cerrado según las condiciones que las requiera. En la Figura 15, se muestra parte del Metro de Barcelona.

Figura 15. Metro de Barcelona, Adaptado de “Túneles”, por FCC Construcción. 2020.

1.5 Construcciones de túneles en Lima, Perú

El proyecto Vía Parque Rímac

Es un proyecto de desarrollo integral de la ciudad y su desarrollo urbano, que además de modernizar la gestión del tráfico mejoró las condiciones ambientales del río Rímac. Además, esta nueva obra de infraestructura vial, emprendida por la Municipalidad de Lima Metropolitana, permitió conectar de manera rápida y segura la Vía de Evitamiento con el Callao, disminuyendo la congestión vehicular en ese tramo. Por otro lado, Permitió la integración de 11 distritos, incluyendo el Cercado de Lima y el distrito de San Juan de Lurigancho.

El megaproyecto Vía Parque Rímac tuvo una inversión de más 2,000 millones de soles y que modernizó el tráfico vehicular y las condiciones ambientales de la ciudad. La empresa constructora a cargo que ejecutó este importante proyecto es la brasileña OAS, constructora internacional presente en 16 países en el mundo. La figura 16, muestra uno de los procesos de construcción de la obra Vía parque Rímac.

Figura 16. Proyecto Vía parque Rímac. Adaptado por “Juan Arellano Valdivia – Diario Correo”, 2020.

Túnel Néstor Gambetta

El nuevo Túnel Néstor Gambetta es la obra vial que interconecta una de las vías más importantes de la provincia del Callao. Inicia en el Km. 19+500 de la Av. Néstor Gambetta, a unos 500

m del Óvalo 200 millas, punto donde se intersecta con la Av. Elmer Faucett y la Néstor Gambetta. Ahorra tiempos de viaje al mejorar el tráfico vehicular en beneficio de más de 2 millones de personas que residen y transitan por la zona y demandará una inversión del Estado de USD 264 millones. Por otro lado, el proyecto se destaca por su envergadura e innovación en su construcción. Es el primer túnel urbano de casi 1 km. de longitud, su diseño permite albergar dos vías de tres carriles para vehículos automotores y dos vías ferroviarias. A sí mismo, a construcción de esta importante obra fue otorgada al Consorcio Túnel Callao, integrado por las empresas constructoras Andrade Gutiérrez S.A. Sucursal Perú, Quiroz Galvao S.A. Sucursal Perú e Ingenieros Civiles y Contratistas Generales (ICCGSA). La Figura 17, muestra el interior del túnel Gambetta en sus últimos procesos para la entrega del proyecto.

Figura 17. Túnel Néstor Gambetta. Adaptado por “Juan Arellano Valdivia – Diario Comercio”, 2020.

Túnel de Benavides en Surco

La obra tiene 800 metros de longitud y pasa por debajo de la Panamericana Sur. Esta obra vincula la Panamericana Sur con la avenida Juan Pablo II y nos lleva a San Juan de Miraflores, Villa María del Triunfo y Villa el Salvador, además alivia considerablemente el tránsito, este túnel es de lo más modernos porque cuenta con paneles de acero incombustible y con sistemas de alta tecnología para cualquier incidente que pueda producirse dentro de este. En la Figura 18 se muestra los últimos procesos de la construcción del túnel de Benavides.

Figura 18. Túnel de Benavides. Adaptado por “Francisco Ortiz - América Noticias”, 2020.

1.6 Guía de Normativas de Túneles Urbanos

En la actualidad existen varias normativas para los procesos de construcción y seguridad de túneles en países como España, Japón, Chile, a comparación con el Perú que existen normativas definidas pero para proyectos a poca escala, ya que en el país nunca se había propuesto un proyecto de tal magnitud, como la que es la construcción de la Línea 2 del metro de Lima, en la cual el proyecto está guiado por construcciones ya realizadas en otros países, como por ejemplo el Ministerio de Transporte y Comunicaciones presenta sus normativas para secciones de un túnel guiándose de estudios de túneles de Francia (CETU), en la Figura 19, se muestra una sección transversal de un túnel realizado por el centro de estudios de Francia y adaptado a la normativa peruana mediante el Ministerio de Transporte y Comunicaciones .

Figura 19. Sección de túnel. Adaptado por “Ministerio de Transporte y comunicaciones”, 2020.

Una normativa existente, como la española (IOS 98), en donde su objetivo es en establecer criterios básicos para un proyecto de construcción en obras subterráneas que constituyan proyectos de infraestructura del transporte (ferrovías). Esta normativa explica que en el proyecto se deben de tener en cuenta requisitos esenciales la cuales son:

- Resistencia mecánica y estabilidad
- Seguridad en caso de incendio o de emergencias imprevistas
- Seguridad de utilización

En el (IOS 98) existe ya pactado los criterios básicos en la fase de construcción la cuales son secuenciales y son:

- ✓ Memoria de construcción
- ✓ Instalaciones para la construcción
- ✓ Instrumentación
- ✓ Maquinaria
- ✓ Explosivos (dependiendo del método a utilizar)
- ✓ Proceso constructivo
 - Saneamiento
 - Perforación
 - Excavación
 - Carga, transporte, vertido y acopio

- Sostenimiento
 - Revestimiento
 - Construcción con máquinas integrales
- ✓ Prevención de riesgos laborales

Esta normativa tiene un enfoque más por el tema de seguridad en la construcción de túneles, ya que en este país (España), presenta una gran variedad y extensión de ferrovías tanto subterráneas como en la superficie, por lo cual se tiene que tener un buen plan de control contra emergencias antes, durante y después de la construcción del proyecto, es por eso que en la fase de instrumentación se toma gran importancia, ya que se trata de que las instalaciones eléctricas internas como los sensores de emergencias se encuentren realmente operativas para cualquier incidente que pueda pasar durante la construcción y durante el uso del proyecto para los usuarios.

Por otro lado, en China existe mucho desarrollo en túneles, se podría decir que es uno de los países más avanzados en este tema, lamentablemente, no se le había prestado mucha atención durante la construcción de varios túneles subterráneos construidos en los primeros tiempos en China, que dieron como resultado una baja eficiencia de todo el sistema y otros problemas de utilidad más adelante. Por lo tanto, hubo una necesidad muy urgente de un plan general científico de utilidad subterránea del túnel. Para mantener la sustentabilidad, la construcción de túneles subterráneos en áreas específicas requiere mucho cuidado en la construcción. Por lo tanto, para reducir el costo, es esencial estudiar la viabilidad de la integración de oportunidades de construcción de túneles subterráneos de servicios públicos y otros proyectos, por ejemplo:

- Combinado con el desarrollo de nuevas ciudades y la construcción de nuevas carreteras.
- Combinado con la renovación urbana, la reconstrucción de carreteras, la regulación del río y el uso del espacio subterráneo.
- Combinado con la construcción del sistema de metro, carretera subterránea, sistema BRT, etc.

Las Leyes y regulaciones garantizadas en las normativas de China que tienen varios beneficiarios (por ejemplo, gobierno, privados, varias compañías de servicios públicos, banco). Se deben establecer regulaciones para resolver las disputas sobre propiedad, rendimiento de la inversión, mecanismo de cargo, etc. Para la construcción de túneles de utilidad subterráneos, que es una premisa para el rápido crecimiento de las ciudades. De acuerdo con la experiencia de China, el sistema legal para el túnel subterráneo de utilidad por lo general consta de tres partes que es ley

de gestión integral, políticas de apoyo financiero y otras reglamentaciones complementarias locales. Los que deben incluir los siguientes problemas clave:

- ✓ Propiedad del túnel de utilidad, como la propiedad de los derechos de uso de la tierra, derechos de propiedad, derechos de franquicia, etc.
- ✓ Patrocinadores, participantes y el mecanismo de coordinación.
- ✓ Modo de compartir de la inversión inicial.
- ✓ Mecanismo de carga y método de distribución de beneficios.

CAPÍTULO 2. MATERIAL Y MÉTODOS

En el siguiente capítulo se menciona lo correspondiente a población, elementos climáticos, tipo de suelo y características sociales siendo parte de todo lo mencionado en material. Así mismo, la identificación de métodos a aplicar en la Línea 2 del metro de Lima, artículos urbanos, países europeos y americanos en donde se han aplicado los métodos mencionados en la tesis.

Por último, se muestra un diseño de investigación, las técnicas de procedimiento y análisis de datos para el sostenimiento primario y sostenimiento secundario (revestimiento), la cual se propone en esta tesis.

Es muy importante mencionar que este diseño que se propone está basado según la investigación realizada por Rodrigo Alfonso Chirinos Verano con respecto a su tesis titulada “Diseño Geotécnico de 1 km de túnel para la Línea 2 de la Red Básica del Metro de Lima y Callao” en el cual nos brinda todos los datos necesarios para poder diseñar un sostenimiento primario y secundario para el proyecto mencionado.

2.1 Material

2.1.1 Población

En este capítulo encontraremos información de las características urbanas, físicas, geomorfológica y social el cual comprende todo el proyecto de la línea 2 del Metro de Lima.

2.1.1.1 Características Urbanas

Lima es la capital y la ciudad más grande de Perú, situado en el valle de los ríos Chillón, Rímac y Lurín. Mientras que una geografía compleja de montañas y un desierto marcan los límites en

todas las demás direcciones. Con una población de más de 7 millones habitantes, Lima es la ciudad más poblada del Perú, que representa aproximadamente el 25% de la población nacional (INEI, 2018). Como nos menciona Inostroza. (2017):

La ciudad está dividida en 43 distritos administrativos. La ciudad se ha expandido a tasas muy rápidas, con un promedio de 1,258 ha por año durante las últimas dos décadas. Al igual que en Bogotá, Lima también ha aumentado en densidad, principalmente debido a las restricciones geográficas. La densidad neta aumentó 12% en Lima, de 133 a 149 habitantes por hectárea, que es más alta que el promedio de América Latina.

Debido al complejo entorno geográfico de la ciudad, la mayoría de este desarrollo ha tenido lugar escalando los valles de los ríos y hacia las montañas. “El área total de la ciudad es de alrededor de 74,300 hectáreas” (Inostroza, 2013).

2.1.1.1.1 Ubicación geográfica

En la Figura 20, se muestra el recorrido de la Línea 2 del Metro de Lima con cada una de las estaciones que las complementan, sumado el recorrido de la Línea 4.

Figura 20. Primera línea de Metro Subterráneo. Adaptado de “Editorial Autoridad Autónoma del Sistema eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao”, 2020.

2.1.1.1.1.1 Zonificación

Este proyecto unirá 13 distritos mediante 27 estaciones en su recorrido los cuales serán Óvalo Garibaldi, Buenos Aires, Juan Pablo II, Insurgentes, Carmen de la Legua, Oscar R. Benavides,

San Marcos, Elio, La Alborada, Tingo María, Parque Murillo, Plaza Bolognesi, Estación Central, Plaza Manco Cápac, Cangallo, 28 de Julio, Nicolás Ayllón, Circunvalación, Nicolás Arriola, Evitamiento, Óvalo Santa Anita, Colectora Industrial, La Cultura, Mercado Santa Anita, Vista Alegre, Prolongación Javier Prado y Municipalidad de Ate. A sí mismo, esta conexión lograra la interconexión con el Metropolitano en la estación central de la línea 1 y con la futura línea 4 en la estación Carmen de la Legua.

2.1.1.2 Características físicas

2.1.1.2.1 Elementos climáticos

Para este caso el clima de Lima es bastante particular, ya que combina una ausencia de precipitaciones con una humedad atmosférica muy alta y una nubosidad constante, esto es originada porque se encuentra en la costa del país.

Lima también es llamada “Lima la gris”, porque presenta un cielo de ese color, causado por su nubosidad, Lima cuenta con un clima tibio sin excesivo calor tropical ni fríos extremos, la temperatura promedio que presenta anual es de 19°C con un máximo cercano a los 29°C. Los veranos de diciembre a abril, presentan temperaturas que oscilan entre los 21°C y 29°C. Solamente cuando ocurre el Fenómeno del Niño la temperatura de verano puede superar los 31°C. Los inviernos van de junio a mediados de septiembre con temperaturas que oscilan los 12°C y los 19°C. Los meses de primavera y otoño (mayo, septiembre y octubre) hay temperaturas templadas que oscilan entre los 17°C y 23°C.

2.1.1.3 Características Geo-Morfológicas

2.1.1.3.1 Tipo de suelo

En la mayor parte del área central de Lima y distritos aledaños, los suelos materiales granulares, se pueden clasificarse como conglomerado de canto rodado, gravas, arenas y limos íntimamente mezclados, en su totalidad ígneos, que pertenecen al gran cono de deyección del río Rímac, formado por material de acarreo en un tiempo geológico muy largo, perteneciente al cuaternario. Así mismo, se puede acotar que para el estudio de la primera etapa 1A del proyecto se encontró tres tipos de estratos los cuales son grava pobremente graduado (GP), arena pobremente graduada (SP) y arcilla baja (CL).

La provincia de Lima presenta variedad de suelos en todo su territorio en las cuales existen parámetros y control de esta, de acuerdo a la zonificación, esto es guiado por un mapa en donde

se ha determinado cada tipo de suelo. En la Figura 21 se muestra la diversidad tipo de suelo que presenta Lima.

Figura 21. Mapas de suelos en los distritos de Lima. Adaptado de “Sistema Nacional de Información Ambiental”, 2020.

Por otro lado, se puede especificar lo siguiente de la obra en construcción:

- Gravas mal graduadas 90% y arenas limosas 10%.
- En las partes bajas existen arcillas y limos con arena de alta plasticidad compresibles 3%.
- Hasta la progresiva de 2 km se encuentran cantos rodados con arcillas y limos de poca cementación.
- Hasta los 2.5 km se presenta el conglomerado de Lima
- Variabilidad de las formaciones, con cambios litológicos(roca)
- Suelos arcillosos y limosos abrasivos

2.1.1.4 Características sociales

La población reciente y futura a nivel nacional y nivel provincial y la porción en porcentaje de la población en el área Metropolitana de Lima y Callao en el Perú se ha incrementado gradualmente del 30% al 34% la cual se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de la Población Reciente y Futura

Año	Área Metropolitana de Lima y Callao (%)	Provincia de Lima	Provincia del Callao
2000	29.9	6 968 339	788 961
2005	30.5	7 622 791	866 877
2012	31.4	8 481 415	969 170
2020	32.6	9 609 386	1 081 491
2030	33.9	10 963 461	1 211 789

Nota: Se puede observar el crecimiento de la población por intervalos de tiempo de la ciudad de Lima, mediante estudios estadísticos. Adaptado de “Francisco Mejía - Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área Metropolitana de Lima y Callao”, por MTC, 2020.

2.2 Método

2.2.1 Nivel de investigación

En el siguiente capítulo se brinda la información sobre los métodos constructivos que se están aplicando hasta la fecha en la línea 2 del Metro de Lima y como sustento de esta información se presenta artículos de túneles urbanos desarrollados con los mismos métodos.

2.2.1.1 Identificación de métodos a aplicar en la línea 2 del Metro de Lima

Se identificó en una visita realizada a obra que se está utilizando el método NATM para el primer tramo (10 km) de conducción del túnel que vendría a ser desde la estación plaza Bolognesi hasta el final del tramo que es la Municipalidad de Ate. A sí mismo, se observó que las estaciones están siendo construidas por un método convencional también conocido como el CUT and OVER, donde se excava desde la superficie la totalidad o parte del hueco que ocupa el túnel, esta se construye dentro del espacio a cielo abierto y se cubre una vez terminado, requiere de un sistema de sostenimiento fuerte para soportar las cargas del material que cubre al túnel.

Por otro lado, el proceso constructivo del NATM esta explicado en la parte superior del formato. A sí mismo, podemos afirmar que a la fecha se está avanzando de manera progresiva el túnel. Como se puede apreciar en las siguientes figuras en la cual muestra una visita que se hizo a la estación Santa Anita de la línea 2 del Metro. En la figura 22, 23 y 24 se muestra el interior de la futura estación Santa Anita de la Línea 2 del Metro de Lima.

Figura 22. Vista a la Estación Santa Anita de la Línea 2 del Metro de Lima. Fuente propia, 2020.

Figura 23. Método de excavación (cut and over) en la estación Santa Anita de la Línea 2 del Metro de Lima. Fuente propia, 2020.

Figura 24. Método NATM en la construcción del túnel de la Línea 2 del Metro de Lima. Fuente propia, 2020.

En este proyecto, también se utilizarán dos tuneladoras (TBM), una para un tramo sin napa freática y otro para un tramo con napa freática, las cuales serán colocados para comenzar con la excavación en dos tramos distintos, la primera tuneladora de tipo EPB trabajará desde la estación Plaza Bolognesi hasta la estación O. Benavides y la segunda trabajará desde la estación O. Benavides hasta el puerto del Callao, posteriormente con esta misma tuneladora se trabajará desde la estación Carmen de la Legua hasta la Av. Gambeta.

Se utilizará este método de construcción para lo correspondiente a la etapa 2 de la línea 2, estas tuneladoras trabajarán casi simultáneamente, con tan solo un mes y medio de desfase. La manera de trabajo de las tuneladoras es la siguiente:

- Previo ensamble de esta se introduce en el área donde se requiere la excavación.
- Esta permite una excavación continua, apoyándose en sus anillos de hormigón en la parte frontal para avanzar.
- Todo el material que es removido, es transportado a través de unas fajas las cuales lo almacenan para su posterior transporte al botadero o reutilización.
- A la par, existe un brazo hidráulico que va colocando unas dovelas pre-fabricadas, las cuales tienen dimensiones y sitios predeterminados y predefinidos.
- La tuneladora solo se detiene cuando es necesario un mantenimiento o son necesarias más dovelas para seguir.

Es importante aclarar que, para el correcto avance de la tuneladora, es necesario que las estaciones estén terminadas a nivel de losa de fondo.

Sin embargo, en la visita realizada se mencionó que aún el contratista presenta algunos inconvenientes para realizar los trabajos de excavación, ya que el Estado no le facilita los terrenos en las cuales se va a trabajar el proyecto. La consecuencia de este problema causa que la obra se alargue con el tiempo de entrega, puesto a que las tuneladoras requieren de meses de instalación (seis meses), en la Figura 25 y 26 se muestra como las partes de la tuneladora aún siguen desarmadas, esto quiere decir que aproximadamente el tiempo para que la tuneladora comience a funcionar en su totalidad es de un año y medio de haber habilitado los terrenos por el Estado.

Figura 25. Parte Frontal de la tuneladora TBM. Fuente propia, 2020.

Figura 26. Dovelas de la tuneladora TBM. Fuente propia, 2020.

2.2.1.2 Artículos de metros urbanos

2.2.1.2.1 Países Europeos

Línea 9 del Metro de Barcelona

La construcción de túneles se realizan mediante máquinas tuneladoras, excepto algunos tramos en muros pantalla, y el sistema incluye además la construcción de algunos viaductos. El trazado está formado por cuatro tramos y cruza horizontalmente la ciudad de Barcelona. A medida que se avanza en la perforación se van colocando dovelas prefabricadas de concreto armado, que conforman túneles entre 9 y 12 metros de diámetro. El trazado es subterráneo en la mayor parte y cada vía y andén circulan por un mismo túnel, pero a niveles diferentes uno encima del otro. La mayoría de las estaciones se encuentran a profundidades entre 25 y 50 metros a fin de evitar problemas de afección en la superficie. Las estaciones que se encuentran en partes más profundas del túnel han sido construidas mediante pozos circulares. La ejecución del túnel en dos niveles dispone de una losa intermedia, ejecutada con carro de encofrado móvil, lo que permite maniobras entre estaciones. El túnel excavado y compuesto por las dovelas, se sella con el revestimiento final y el terreno en la zona de intersección. En los muros de los pozos de acceso, se realiza un tratamiento especial que permite impermeabilizar la zona y así aislarlo del agua. Posteriormente se realiza la remoción de los segmentos en la intersección y de este modo se conecta el túnel con los diferentes accesos.

Los pozos de acceso están equipados con ascensores de alta capacidad y escaleras de emergencia. Se prevé que los ascensores estén sincronizados con la llegada y salida de los trenes, para reducir el tiempo de espera en la parte inferior del pozo de acceso. El número de ascensores por cada pozo varía entre cuatro y ocho en función del tráfico esperado de pasajeros. Se dispuso también de dos ascensores para peatones en condición de discapacidad. En la Figura 27 muestra uno de los pozos junto con una tuneladora TBM en pleno trabajo.

Figura 27. Publicación realizada desde la cuenta oficial de Blog 360° en Concreto. Adaptado “Construcción de la línea 9 del Metro de Barcelona” por Silva J, 2020.

2.2.1.2.2 Países Americanos

Línea 6 del Metro de Santiago

El Metro de Santiago es la línea más moderna y reciente de toda la ciudad, su trayectoria se muestra en la Figura 28.

La Línea 6 se caracteriza porque es la primera que es 100% automática de todos los Metros de Santiago. Recorre desde Cerrillos hasta Providencia avanzando de forma paralela a Línea 1, generando una alternativa de viaje cómoda. La construcción corresponde al sistema austríaco NATM empleado por primera vez por la Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A. con oportunidad de la construcción del primer tramo de Línea 5. Este método define detalladamente todas las etapas del proceso constructivo y cuyo cumplimiento garantiza la seguridad de las obras y sus trabajadores. El método requiere, no obstante, de un monitoreo topográfico permanente para asegurar las coordenadas de las obras y detectar oportunamente cualquier variación del terreno y de las edificaciones contiguas.

La aplicación del Método NATM es especialmente apropiada para los suelos de Santiago, contemplando el empleo de equipos tradicionales en las excavaciones, pero más desarrollados tecnológicamente en las aplicaciones del concreto proyectado (shotcrete).

Figura 28. Línea 6 del Metro de Santiago. Adaptado de “Editorial - Administración y Transporte CI”, 2020.

2.2.2 Diseño de Investigación

En la Figura 29 se muestra el diseño de investigación en la cual se basa esta tesis.

Figura 29. Diseño de Investigación. Fuente propia, 2020

CAPÍTULO 3. EXCAVACIÓN, REVESTIMIENTO Y SOSTENIMIENTO EN TÚNELES SUBTERRÁNEOS

En este capítulo se comenta todo sobre lo relacionado con los objetivos específicos de dicha investigación, de cómo identificar los procesos de excavación en proyectos de túneles subterráneos, en el cual se menciona los métodos convencionales existentes, los más usados en la actualidad y el uso de las tuneladoras.

Por otro lado, la determinación de obras preliminares para frentes de excavación del método NATM en el cual se comenta sobre las obras previas y túneles de intercepción. Así mismo, se aprecia el tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en túneles subterráneos en el cual se comenta sobre sus diferencias, utilidades, funciones y sus distintos tipos de revestimiento.

3.1 Describir los distintos procesos de excavación en proyectos de túneles subterráneos.

La línea de un Metro subterráneo está compuesta por un conjunto de estructuras bajo tierra que se conectan entre sí, conformado por un ducto continuo por el cual se movilizan miles de personas diariamente. Para su construcción existen varios factores, al inicio se determina la ubicación del trazado ya sea en superficie, elevado por viaductos o subterráneo por medio de túneles. En caso se dé por un trazado subterráneo, como se vio en partes anteriores del documento, existen diferentes métodos para la construcción de los túneles y estaciones.

La construcción de una nueva línea de Metro subterránea queda definida por un conjunto de parámetros y decisiones, entre los que se destacan su longitud, el trazado y su geometría, el número de estaciones, la sección de los túneles y el método constructivo a utilizar. No es lo mismo construir una línea de 12 km de largo con 17 estaciones en las comunas periféricas de la ciudad, que construir una línea de 35 km que cruce el centro de la ciudad, con 27 estaciones. La diferencia logística es tremenda, por lo cual decisiones como la geometría de los túneles y el método constructivo a utilizar, son cruciales.

Como se aprecia en la Figura 30, la construcción de una línea de Metro se puede abordar desde varios frentes. Al respecto González (2016) señala que:

El túnel puede ser construido en varios tramos de acuerdo a sus características geotécnicas, planificación de la obra o por el método constructivo, de ahí que, para una línea de

Metro extensa, algunos tramos pueden ser construidos siguiendo el método NATM y otros mediante el uso de una o más máquinas tuneladoras de igual o distinta tipología.

Figura 30. Esquema de construcción típica de una línea de metro. Fuente propia, 2020.

Cualquiera sea el método de construcción elegido, NATM, BELGA, ALEMAN, BERNOLD o TBM, existe una serie de aspectos a considerar, como su ubicación estratégica, las instalaciones de faena, la construcción de estructuras previas de soporte, el número de frentes de ataque en simultaneo y acceso a la construcción de túneles, la maquinaria a utilizar y su disponibilidad entre otras cosas que se podrían presentar por ser una obra compleja. Todas las consideraciones importantes para cada método constructivo se listan a continuación.

3.1.1 Métodos Convencionales de Excavación de Túneles Subterráneos

3.1.1.1 Método Belga

El método belga o también denominado Método Tradicional de Madrid, se caracteriza por la progresiva excavación de los elementos que componen el túnel, de tal forma que se van retirando los elementos más estables del túnel evitando el hundimiento o la falta de estabilidad del frente. Se aplica a túneles con un ancho máximo de 11 m tomando en cuenta unos 8 m libres más 3 m de ambos hastiales, por ello se dice que es un método muy antiguo y laborioso.

Este método consiste en realizar la excavación abriendo una pequeña galería en clave del túnel para ir ensanchándola poco a poco, protegiendo y entibando el frente, hasta permitir hormigonar toda la bóveda, en la Figura 31 se muestra el avance de este método. El primer elemento excavado es la bóveda del túnel (se suele denominar avance en bóveda o calota). La bóveda se sostiene en el terreno mediante un entramado progresivo de madera. La bóveda se asegura con un encofrado y cuando está asegurada, la parte inferior se va excavando a medida que se va asegurando el avance. De esta forma la galería se va construyendo a medida que se avanza sin poner en riesgo a los trabajadores debido al hundimiento del túnel. Al abrir pequeñas secciones es posible solucionar cualquier problema que pudiera surgir de inestabilidad, puesto que la seguridad del método se basa en que se trabaja con un frente muy pequeño, normalmente inferior a 3 m². De hecho, solo se ha producido un accidente grave con este método, el acontecido en 1971 en la construcción de la línea 7 desde Avenida de América a Pueblo Nuevo.

Este método tiene la ventaja de estar muy comprobado en la práctica de la ingeniería civil, aunque su punto en contra es el escaso rendimiento en comparación con otros más efectivos, como las tuneladoras de frente cerrado. Los rendimientos que se obtienen por este método para los túneles de línea, suelen ser de 2,5 metros por día y frente de trabajo con tres equipos (12 personas por equipo en tres turnos). Los avances mensuales por frente de excavación se sitúan entre los 40 y 55 metros.

Figura 31. Método Belga, Adaptado de "Consejería de Transportes, Infraestructura y Vivienda", por Comunidad Madrid. 2020.

3.1.1.2 Método Alemán

Se aplica en terrenos muy malos y/o de luces relativamente grandes, superior a 8 m, con anchos de galería por lo general mayor a 50 m². Durante los primeros tiempos de aplicación del método se excava de la parte inferior hacia la zona de la bóveda, reduciendo a entibación al mínimo y generando de primera instancia los hastiales. Con respecto al método belga permuta el orden de sus fases (hastiales-bóveda-destroza-solera). La ejecución de dos galerías iniciales se desarrolla con el fin de ejecutar con anterioridad a la bóveda la excavación de los hastiales para evitar los posibles asentamientos de aquella. Terminados estos, puede ejecutarse la bóveda, que se apoya en los estribos previamente hormigonados de los hastiales. Finalmente se ejecutará la solera. Este método es más costoso y demora más, pero resulta más segura en condiciones malas de terreno. En la Figura 32 y 33 se muestra el procedimiento del método descrito.

Figura 32. Procedimiento del Método Alemán, Adaptado de "Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas", por Rubén Álvarez - Open Course Ware. 2020.

Figura 33. Procedimiento del Método Alemán, Adaptado de "Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas", por Rubén Álvarez - Open Course Ware. 2020.

3.1.1.3 Método Bernold

El sistema Bernold permite colocar una bóveda de hormigón vibrado de forma inmediata a la ejecución de la excavación, en la Figura 34 se muestra lo mencionado. La bóveda presentara una resistencia uniforme, predeterminada, con una íntima unión al terreno, para la ejecución de esta metodología se requiere de lo siguiente:

Cerchas de montaje

Perfiles de ala ancha (HEB) curvadas con el radio hormigonado, provistas de articulaciones para desmontarlas y para su transporte al frente. Se dimensionan para soportar el empuje del hormigón que se colocara tras la chapa y la presión de las rocas hasta que el revestimiento alcance su totalidad de capacidad resistente.

Chapas Bernold

Chapas troqueladas, onduladas y curvadas con el radio requerido, con medidas de 1080x1200 (una vez montada su superficie útil será de 1 m²) y espesores de 2/3 mm, el cual actuará como encofrado en el hormigonado y de armadura del hormigón cuando este haya fraguado. Se montan sobre la cercha y se solapan entre sí, empleando pernos para entrelazarlas.

Separadores

Empleados para arriostrar longitudinalmente las cerchas, deben ser encajonados en unas chapas que presenten las cerchas.

Figura 34. Método Bernold, Adaptado de "Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas", por Rubén Álvarez - Open Course Ware. 2020.

3.1.2 El uso de Tuneladoras en la Línea 2 del Metro de Lima

Para la construcción de una Línea de Metro mediante el uso de una tuneladora TBM, se tiene que tener presente consideraciones especiales antes de aventurarse en un proyecto de este tipo.

Uno de los puntos más importantes a considerar es la disponibilidad del escudo EPB, ya que tener una de estas máquinas en la obra, no siempre es factible y requiere de un estudio complejo de una serie de variables como las que se indican en el punto 1.2 del formato. El diseño, construcción y transporte que tarda es por lo menos 12 meses en poner en marcha la tuneladora, es un plazo que deberá ser considerado en la planificación de la obra.

Estas tuneladoras son fabricadas especialmente de acuerdo a los requerimientos que solicita cada obra determinada, aunque en la actualidad existe la disponibilidad de usar maquinarias reacondicionadas en la cual produzca un desempeño semejante al de una tuneladora nueva y cumpla con los mismos requisitos del proyecto. Por lo general, las grandes constructoras de túneles a nivel mundial, cuentan con varios escudos en su parque de maquinarias.

3.1.2.1 Obras previas

A diferencia del método convencional NATM, donde se puede contar con múltiples frentes de excavación simultáneos, el uso de máquinas tuneladoras condiciona el número de frentes, a la cantidad de máquinas que se disponga y que comúnmente no supera las 2 unidades por línea.

Como ya se menciona anteriormente, una TBM (EPB) nueva tarda por lo menos 12 meses en estar disponible en obra. Durante el tiempo de fabricación de la máquina lo que se hace es avanzar en la construcción de estaciones, piques y galerías. Además de la fabricación de dovelas en las plantas previstas para su adquisición e instalaciones que darán soporte a la máquina.

La Figura 35 muestra el momento exacto cuando un escudo EPB destruye el muro de una estación en la construcción del Metro de Sydney. El cruce de una estación es necesario para inspeccionar y realizar mantenimiento a la máquina y prepararla para el nuevo tramo a excavar.

Figura 35. Escudo EPB rompe muro de estación en el Metro de Sydney. Adaptado de “Estudio de pre-factibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

Con la finalidad de no retrasar el paso de la tuneladora, es común hacer la construcción de estaciones rectangulares, mediante el método Cut and Cover. Al respecto González (2016) señala que:

Este tipo de estación se aplica en contextos donde hay disponibilidad de espacio superficial para poder realizar las obras. Toda la estación se construye desde el nivel de calle. El largo de la estación es equivalente al del túnel de las estaciones tipo caverna, 120 m, y la profundidad es consecuencia de la cota riel del trazado. En el interior de la estructura se realizan todas las obras e instalaciones para convertirla en accesible.

En general, con la finalidad de limitar el impacto ambiental superficial y restituir lo antes posible la vialidad de las áreas, se prefiere la metodología de ejecución en Cut and Cover con la modalidad Top-Down. En esta metodología, se realizan de inmediato todas las losas horizontales con concreto armado para luego ejecutar, sucesivamente, las excavaciones bajo la cobertura. De este modo es posible restituir el tránsito en un plazo muy corto. En la Figura 36 se muestran las etapas del método Cut and Cover con modalidad Top-Down.

Figura 36. Esquema Cut and Cover modalidad Top Down. Adaptado de “Estudio de Prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante máquinas tuneladoras” por Aguilar R. 2020.

Las estaciones ejecutadas con el método Cut & Cover poseen ventajas en términos de inversión, con los sistemas de ventilación, facilidad de conexión con la superficie y por último plazos de construcción notablemente inferiores. Sin embargo, para los proyectos del Metro de Lima se privilegia la elección de estaciones tipo caverna debido a la nula interferencia con el tránsito vehicular. Este tipo de estaciones también pueden ser atravesadas sin problemas por las tuneladoras, ya que el túnel de la estación tiene una sección mayor que el túnel de vías, permitiendo una libre circulación de la máquina. En este último caso, la construcción de las estaciones pasa a ser una tarea crítica capaz de retrasar el avance de la tuneladora.

Otra de las obras previas mencionadas, es la fábrica de dovelas y el resto de infraestructuras que alimentan a la tuneladora, ya sea de energía, agua, mortero o herramientas. Esto no es un problema menor, ya que se requiere de un terreno lo suficientemente amplio para albergar las instalaciones y los sectores de acopio de dovelas y del material excavado.

3.1.2.2 Túnel de Interestación

La excavación del túnel comienza desde la entrada en un extremo del trazado, o bien desde algún pique intermedio por el cual empezara la excavación del túnel por un frente con un ritmo de avance creciente comparado con el NATM, logrando promedios de avance sobre los 33 a 42m diarios según la condición del terreno, que completarán el túnel interestación hasta alcanzar el cruce de las estaciones.

En la Figura 37, se esquematiza el avance de una TBM(EPB), que excava el túnel interestación hasta alcanzar una estación ya construida, para luego continuar al siguiente tramo, las estaciones pueden ser del tipo caverna o rectangulares. Notar que para esta modalidad no se requiere de pique intermedio entre las estaciones.

Figura 37. Esquema de avance de una máquina tuneladora. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

El túnel interestación tiene una sección circular con un diámetro interior de 9.5 m aproximadamente, dado por el tamaño final del anillo de revestimiento, este diámetro permite la circulación de dos vías al interior del túnel. Otra de las opciones es la construcción de dos túneles paralelos, con un diámetro interior más pequeño de aproximadamente 5 m, que alberga cada una de las vías. Ejemplos de ambas secciones se muestran en la Figura 38 y 39.

Figura 38. Sección circular doble vía. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

Figura 39. Sección circular bi-tubo, vías separadas. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM”, por Aguilar R. 2020.

3.2 Describir las obras preliminares para frentes de excavación del método NATM.

3.2.1 Obras Previas

Las estaciones, piques y galerías forman parte de las obras previas que deben iniciarse antes de la excavación de los túneles subterráneos, pues estas estructuras hacen que sea posible el acceso al lugar donde se ubica el trazado y donde comienza la excavación de los túneles. Por lo general, las estaciones se construyen en forma paralela con los túneles, sin interferir unos con otros, ya que cada obra solo conecta una con otra. En consecuencia, las galerías y piques dan lugar a los frentes de trabajo de los túneles, siendo por allí el ingreso de personas, maquinarias, materiales de construcción y siendo los lugares por donde se va retirar todo el material excavado.

El proceso constructivo de estas obras previas, se detalla a continuación:

3.2.1.1 Estaciones

Con la finalidad de no interrumpir el tránsito en las avenidas que coinciden con el trazado de la Línea de metro, la construcción de las estaciones se afronta de manera subterránea con algún método previsto, proponiendo como necesario la construcción de un pique al costado del trazado, seguido de una galería de conexión que permita el acceso entre túnel

y estación. Dada la naturaleza de estas obras, no es posible ejecutarlas de manera simultánea, por lo cual se sigue la siguiente secuencia.

- Pique circular
- Galería de acceso
- Túnel estación

El pique tiene un diámetro de 25 m aproximadamente y una profundidad que depende de la cota necesaria para la excavación de la galería de acceso, típicamente entre 20 y 35 m, durante la construcción sirve para el ingreso y salida de personal, maquinarias, materiales y escombros de la excavación, y en la etapa de servicio es parte del acceso principal a la estación.

La galería de acceso tiene una longitud prevista para la conexión del pique con el túnel estación, que típicamente va entre los 25 y 40 m, en la etapa de servicio alberga el acceso a los andenes y el sector de boleterías. El túnel estación tiene una longitud de 120 metros aproximadamente y una sección que varía entre 160 m² y 200 m² dependiendo del tamaño de la estación, con una sección mayor a la del túnel interestación, en su interior se ubica los pasadizos que hacen posible el ingreso a los vagones del tren. Al respecto González (2016) señala que:

La ejecución de un pique circular se inicia con la construcción del brocal, la excavación se realiza con medios mecánicos empleando una excavadora convencional, en pases de entre 1 y 2 m, la profundidad queda determinada por la cota de las vías, típicamente entre 20 y 25 m. La excavación de cada pase se divide en cuadrantes que se excavan y sostienen sucesivamente.

El orden de excavación es por cuadrantes opuestos tal y como se muestra en la Figura 40. Una vez terminada la excavación de cada una de las subfases descritas, se proyecta una capa de sello y posteriormente dos capas de shotcrete reforzado con una malla electrosoldada. La siguiente fase no se inicia hasta que se finalicen los ciclos de la fase previa. Siguiendo la secuencia constructiva expuesta se alcanza el nivel inferior del pique y, por último, se ejecuta el anillo de fundación.

Figura 40. Fases de excavación del pique en cuadrantes. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

El túnel como la galería de acceso de la estación poseen tamaño y geometría similar, ambos presentan un ancho de excavación aproximado de 16 m y una altura máxima de 12 m. La longitud depende de la distancia entre el pique y el túnel estación, por lo general se excavan galerías entre 30 y 45 m, mientras que el túnel tiene una longitud de 120 m aproximadamente. Adicionalmente, cabe mencionar que la sección del túnel está diseñada para albergar las vías y andenes de 3,5 a 5 m de ancho. El ancho está previsto por número de personas que puede albergar la estación en una máxima demanda, pues esto determinará el tamaño de cada estación.

3.2.1.2 Piques de Construcción

A diferencia de las estaciones que forman parte integral del trazado de la Línea de metro, los piques están enlazados en medio del tramo entre dos estaciones consecutivas, desde cada una de estas obras se avanza hacia ambos lados con frentes de trabajo independientes que tienen como fin unir la estación del túnel colindante, de esta forma se mejora los tiempos de ejecución de las obras, permitiendo iniciar la excavación del túnel interestación sin tener que esperar el avance en la construcción de las estaciones.

Un pique de construcción es una construcción vertical de diámetro 15 m aproximadamente, ubicado a un costado del trazado por donde pasa la línea del metro, haciendo necesario la conexión del túnel con el pique por medio de la construcción de una galería

horizontal y permitiendo la entrada y salida de personas, maquinarias, materiales y escombros de la excavación del túnel. La Figura 41 muestra los elementos que integran un pique de construcción y su conexión con el túnel.

Figura 41. Esquema de pique de construcción típico. Fases de excavación del pique en cuadrantes y maquinaria empleada. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

La geometría de las galerías que conectan los piques con el túnel de interestación es de forma ovalada similar a la geometría de la galería de acceso de la estación. Al respecto González (2016) señala que:

El ancho de excavación de las galerías es de aproximadamente 9,5 m y la altura alcanza los 9 m, tal y como se puede ver en la Figura 42, estas dimensiones hacen razonable la excavación de una gran bóveda en avances de 1 m y luego retrasada a 4 m.

Figura 42. Geometría de las galerías de conexión de piques, Fases de excavación del pique en cuadrantes y maquinaria empleada. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

3.2.1.3 Uso de Concreto Projectado

Este concreto es utilizado en varios tipos de construcción, pero en donde se requiere más de este tipo de material son en los túneles, como por ejemplo ferroviarios, drenajes de agua, ya que brinda una mejor estabilización en las excavaciones.

Para este proyecto de la Línea 2 identificado como una construcción subterránea, requiere de una buena estabilización y revestimiento, debido a que siempre existen elevados esfuerzos y deformaciones de la sección excavada, es por eso que este material es usado en los métodos de construcción para la Línea 2 para poder ayudar con la estabilidad de la sección excavada mientras se va avanzando a lo largo del tramo. En la Figura 43 se puede

observar como son las fases de la excavación de túnel con la ayuda del método de construcción para luego hacer el uso del concreto proyectado.

Figura 43. Método de avance del túnel para el uso del concreto proyectado. Adaptado de “Concreto proyectado en la construcción de túneles”, por Marcio Muniz. 2020.

Para determinar si el uso del concreto proyectado es mejor que el concreto convencional se analizó mediante la Tabla 2 donde se evidencia las ventajas de cada uno de estos materiales para la construcción de un túnel.

Tabla 2. Ventajas del Concreto Proyectado y del Concreto Convencional

Tipo de Revestimiento	Ventajas
Concreto Proyectado	No se necesitan instalaciones adicionales
	Funciona como revestimiento final y estabilización
	Una sola operación completa
	Mayor resistencia a la compresión
Concreto Convencional	Apariencia mas atractiva
	Condiciones de aire comprimido en el túnel
	Menor resistencia que el concreto proyectado

Nota: Se observa un resumen de las características de cada tipo de revestimiento con sus respectivas ventajas para la construcción de túneles, fuente propia, 2020.

De acuerdo a los datos recolectados sobre los tipos de revestimientos, se pudo observar que cada uno de estos presenta características propias, pero al centrarnos hacia el proyecto de la Línea 2, la cual requiere una mayor estabilización a las deformaciones y teniendo en claro que el suelo de Lima presentan estos problemas, se está utilizando el concreto proyectado.

En términos de costos es también más económico el concreto proyectado a comparación del convencional, esta diferencia se detalla en la Tabla 3.

Este tipo de concreto reduce mano de obra al remplazarlo con un operario y la máquina que proyecta el material. Tal como lo señala Martínez (2011), “Realizando un análisis de los costos unitarios, con valores reales de un túnel en Colombia, se lograron establecer una comparación de costos por metro lineal según el tipo de revestimiento”, modificado al tipo de cambio en dólares.

Tabla 3. Costo unitario por metro lineal de túnel

Costo unitario por metro lineal de túnel (dólares)	
Concreto Convencional	2248.6
Concreto Proyectado	1699.4

Nota: Se observa el precio de cada tipo de revestimiento por metro lineal de túnel en dólares, fuente propia, 2020.

Teniendo como dato estos valores de precios se determinó el costo para la primera etapa 1A de Línea 2 que consta de aproximadamente de 4.3 km, para poder tener una comparación en tipos de revestimiento y saber cuál de estos optimiza más los recursos.

Según los datos obtenidos del costo de cada tipo de concreto, se puede observar que al usar el concreto proyectado existe un ahorro de un 24% para el Tramo 1A de la Línea 2 del Metro de Lima como se puede apreciar en la Figura 44, teniendo esto como una ventaja más para el uso del concreto proyectado, es por esto que en el proyecto se usará este tipo de concreto (Proyectado), ya que brinda una mejor optimización de recursos y lo más importante que brinda una mayor estabilidad ante las deformaciones que pueda presentar a la hora de la excavación continua.

Figura 44. Comparación de costos por metro lineal de Túnel mediante Concreto Convencional y Concreto Proyectado, Fuente propia, 2020.

Por otro lado, se realizó la comparativa con las dosificaciones para el concreto proyectado y concreto convencional, la cual se detalla en el siguiente párrafo:

3.2.1.3.1 Dosificación Concreto Proyectado

El diseño de las mezclas para el Concreto Proyectado siempre debe adaptarse a las especificaciones del agregado y del cemento disponible para poder obtener la resistencia inicial y la trabajabilidad requeridas. Los ensayos preliminares en el laboratorio hacen más fáciles las operaciones en obra.

Este tipo de cemento tiene una fuerte influencia en el desarrollo tanto de la resistencia inicial como de la final, así como en las propiedades del concreto endurecido.

Para este diseño optamos por el aditivo SikaFume (aditivo para concreto en forma de polvo, basado en tecnología de humo de sílice que se utiliza en concreto proyectado) para una baja permeabilidad (durabilidad) y para reducir el rebote. Estos dos aditivos SikaTard o ViscoCrete (Plastificantes o Superplastificantes) se utilizan para mejorar el manejo con bajos contenidos de agua. Así mismo, las fibras de acero incrementan la capacidad de carga y las propiedades de ductilidad del Concreto Proyectado. Las fibras de polipropileno son utilizadas para mejorar las propiedades de contracción inicial y obtener una resistencia más alta al fuego. El contenido de aire en el Concreto Proyectado fresco se incrementa para mejorar la manejabilidad.

Aproximadamente el 95% de la superficie del agregado corresponde a la fracción de la arena de 0 - 4 mm. Las variaciones en la arena tienen un fuerte efecto en las propiedades del concreto endurecido. La fracción de arena debe ser analizada con extremo cuidado durante el proceso de control de calidad.

El tamaño máximo del agregado depende del espesor de capa y del acabado de la superficie requerida del Concreto Proyectado.

Distinguimos entre agregado redondo y chancado. La mejor forma de la partícula es cúbica/esférica: esto es muy importante para la trabajabilidad. Además, el agregado debe ser duro, limpio y no debe estar desgastado por la intemperie. En la Tabla 4 y 5, se presentan la dosificación para un concreto proyectado.

Tabla 4. Dosificación Concreto Proyectado Vía Seca

Concreto Proyectado Vía Seca 0 - 8 mm	
Cemento	280 kg
Sika fume	20 kg
Retardante SikaTarrd	0.30%
55% 0 - 4 mm con 4% de humedad	aprox. 680 kg
45% 4 - 8 mm con 2% de humedad	aprox. 560 kg
1 m ³ de mezcla seca (debe ser chequeado en un ensayo en campo)	aprox. 1540 kg
Contenido de cemento	
Para 1000 litros de mezcla seca, 280 kg de cemento es adicionado a 800 litros de agregado.	
Para 1250 litros de mezcla seca, 350 kg de cemento es adicionado a 1000 litros de agregado.	
Resultado de 1 m³ de mezcla seca proyectada:	
Acelerado con Sigunit AF Polvo (rebote 16 - 20 %)	0.58 - 0.61 m ³
Acelerado con Sigunit AF Liquido (rebote 20 - 25 %)	0.55 - 0.058 m ³
Contenido de cemento en el Concreto Proyectado aprox.	450 - 460 kg/m ³

Nota: Se observa en la tabla resultado de 1 m³ de mezcla seca en concreto proyectado, fuente propia, 2020.

Tabla 5. Dosificación Concreto Proyectado Vía Húmeda

Concreto Proyectado Vía Húmeda 0 - 8 mm		
Cemento	425 kg	135 L
Sika fume	20 kg	9 L
Superplastificante SikaTard/ SikaViscoCrete	1.20%	-
Retardante SikaTarrd	0.30%	-
Agregado:		
55% 0 - 4 mm con 4% de humedad (60%)	967 kg	358 L
45% 4 - 8 mm con 2% de humedad (40%)	791 kg	293 L
Agua adicionada (A/C = 0.47)	155 kg	155 L
Volumen de aire (4.5%)	-	45 L
Fibras de Acero	40 kg	5 L
Concreto Proyectado	-	1000 L
Densidad por m3	2398 kg	-
Resultado de 1 m3 de mezcla húmeda proyectada:		
Acelerado con Sigunit AF Líquido (rebote 6 - 10%)	-	0.90 - 0.94 m3
Contenido de cemento en el Concreto Proyectado	-	450 - 470 kg/m3
Contenido de fibras de acero en el Concreto Proyectado	-	30 - 36 kg/m3

Nota: Se observa en la tabla resultado de 1 m3 de mezcla húmeda en concreto proyectado, fuente propia, 2020.

Es importante mencionar que en las dosificaciones del concreto proyectado existan suficientes agregados finos menores o iguales a un tamaño de 0.125 mm para una buena cohesión, en la Tabla 6 se muestra la cantidad de agregados a usar para una mezcla para un concreto proyectado.

Tabla 6. Contenido de finos recomendado para una mezcla para concreto proyectado

Contenido de finos recomendado (agregado total + cemento + agregados finos adicionales):		
Agregado	0 - 8 mm	0 - 16 mm
Redondeado	500 kg/m	450 kg/m
Chancado	525 kg/m	475 kg/m

Nota: Se observa en la tabla la cantidad recomendada de agregados y sus tamaños respectivos para una mezcla de concreto proyectado, fuente propia, 2020.

3.2.1.3.2 Dosificación Concreto Convencional

El concreto convencional tiene una amplia utilización en las estructuras de concreto más comunes, dependiendo de las dimensiones y cuantía del refuerzo del elemento que se va a vaciar se especifica el tipo de agregado requerido y sus proporciones:

- Agregado estándar (tamaño máximo de 1")
- Agregado medio (tamaño máximo ¾")
- Agregado fino (tamaño máximo de ½")

Los materiales y el producto final son controlados y ensayados de acuerdo con el Reglamento Nacional de Construcciones y la norma ACI - 318 cumpliendo con las expectativas de falla y criterios de aceptación establecidos por dichos documentos.

Ventajas:

- Permite ahorro en materia prima y mano de obra versus con el concreto hecho en obra. No requiere alquiler de mezcladora y winche.
- Costo final de la obra menor (m2) y mayor utilidad versus sistema tradicional.
- Vaciado hasta 5 veces más rápido y eficiente versus sistema tradicional en obra
- Optimización de recursos: mayor rotación de su encofrado. Sin desperdicios, al asegurar la cantidad exacta adquirida.

Precauciones:

- Cualquier adición de agua, cemento o aditivo en obra, alterará su diseño y puede ser perjudicial para la calidad del concreto.
- Se debe mantener la superficie húmeda en las primeras horas para evitar contracciones por secado.
- Todo proceso de curado, especialmente en las primeras edades, trae como consecuencia mayor hidratación del cemento y mejor calidad de su obra.

Sugerencias para mejores resultados:

- Contar con el personal y equipos necesarios cuando el concreto llegue a la obra para colocarlo con rapidez.
- Durante el vaciado compactar bien el concreto con vibrador y darle el acabado requerido a la superficie.

El cálculo de materiales varía según las especificaciones, se incrementa proporcionalmente el cemento y se reducen los otros materiales cuando se quieren resistencias más altas, En el caso contrario se reduce el cemento y se aumentan los otros materiales. En la Tabla 7 se muestra las relaciones para concretos de las resistencias de concreto más utilizadas: 3500 PSI, 3224 PSI, 2500 PSI, 2000 PSI y 1500 PSI.

Tabla 7. Dosificación de concreto para cada m3 de acuerdo a su resistencia.

Cantidades	Resistencia			Cemento	Arena m3	Grava m3	Agua L
(cm - ar - gr)	Kg/cm2	PSI	Mpa	(cmt)	(ar)	(gr)	(promedio)
1 – 2 – 2	280	4000	27	420	0.67	0.67	190
1 – 2 – 2.5	240	3555	24	380	0.6	0.76	180
1 – 2 - 3	226	3224	22	350	0.55	0.84	170
1 – 2 – 3.5	210	3000	20	320	0.52	0.9	170
1 – 2 - 4	200	2850	19	300	0.48	0.95	158
1 – 2.5 - 4	189	2700	18	280	0.55	0.89	158
1 – 3 - 3	168	2400	16	300	0.72	0.72	158
1 – 3 - 4	159	2275	15	260	0.63	0.83	163
1 – 3 - 5	140	2000	14	230	0.55	0.92	148
1 – 3 - 6	119	1700	12	210	0.5	1	143
1 – 3 - 7	109	1560	11	175	0.55	0.98	133
1 – 3 - 8	99	1420	10	160	0.55	1.03	125

Nota: Se observa en la tabla las dosificaciones de cemento, arena, grava y agua de acuerdo a la resistencia que se requiera, fuente propia, 2020.

3.2.2 Túnel de Interceptación

Como ya se ha mencionado anteriormente, una de las opciones de trabajo del método NATM es la posibilidad de trabajar en varios frentes en simultáneos, ya que no es necesario el uso de maquinaria específica ni grandes recursos para implementarse. Esta facilidad del método tiene que ser aprovechada para disminuir los tiempos de excavación del túnel interestación, considerando que este método convencional tiene un rendimiento de muy bajo versus una máquina tuneladora. Con este objetivo se construyen piques intermedios entre las estaciones, así el número de frentes excavando el túnel simultáneamente

se multiplica, logrando un gran rendimiento conjunto de todos los frentes. Rendimiento que en definitiva dependerá del número de piques que sea posible construir.

La Figura 45, representa un tramo de túnel entre dos estaciones con un pique de construcción intermedio, en el que flechas rojas representan el avance de los dos frentes de trabajo, la excavación finaliza al acabar el túnel interestación con el túnel estación correspondiente. Al repetir este proceso en cada tramo, se logra la excavación completa de la Línea de Metro proyectada.

Figura 45. Pique de construcción y tramo de túnel interestación. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

El túnel interestación tiene una sección tal que supone excavar aproximadamente 46 m², con un ancho máximo de 10,0 m y una altura de 7,8 m. Esta sección se muestra en la Figura 65.

Figura 46. Geometría del túnel interestación. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

La excavación, tanto de los piques como de las galerías y túneles se realiza con medio mecánicos tal y como se muestra en la Figura 47.

Figura 47. Excavación de túnel por medios mecánicos. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

Se contemplan partes de excavación de 1 m de longitud para las fases de la bóveda y de 4 m en la ejecución de la contrabóveda. Correspondiente a longitudes máximas dependiendo del tipo de terreno. De igual modo, en estos casos también se podrán dividir las fases de excavación en varias subfases.

Para la eliminación de escombros es necesario un sistema compatible con los rendimientos estudiados y debe de tener en cuenta que se realiza en horario de rutina. El sistema más óptimo para este tipo de trabajos es el de cintas verticales que vierten el material a una tolva en superficie que carga directamente los camiones. También existen sistemas de grúas torre, más económicos, pero poco recomendables por sus bajos rendimientos y sistemas con carros verticales que han mostrados un buen desempeño. El esquema de la Figura 48, muestra el sistema de evacuación de escombros de cintas verticales.

Figura 48. Sistema de evacuación de escombros mediante cintas verticales. Adaptado de “Estudio de prefactibilidad para la construcción de túneles de metro mediante TBM” por Aguilar R. 2020.

3.3 Describir el tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en túneles subterráneos

3.3.1 Sostenimiento y revestimiento: diferencias y utilidades

Se refiere a los términos sostenimiento y revestimiento como dos conceptos relacionados en la construcción de túneles, pero no iguales en su definición. También muchos métodos de diseño calculan o proyectan el sostenimiento para asumir las funciones estructurales y solo contemplan el revestimiento como elemento de estética o terminación. En la mayoría de los casos se recomienda que su diseño sea analizado y se tomen por separado, unidos solo en función de razones económicas y constructivas. Es importante realizar las diferenciaciones entre estos elementos debido a que muchos ingenieros y profesionales del campo lo consideran como iguales.

Se denomina soporte o sostenimiento a los elementos estructurales de sujeción del terreno, aplicados inmediatamente después de la excavación de un túnel, con el fin de asegurar su estabilidad durante la construcción y después de ella, así como garantizar las condiciones de seguridad.

La función del sostenimiento está íntimamente ligada al reajuste tensional que se produce en el terreno como consecuencia de la realización de la excavación. Al respecto Orez señala (2014) que:

La necesidad de soporte está condicionada por la capacidad del terreno de alcanzar una situación de equilibrio tras la excavación. El mismo puede ser total, como arco resistente, o parcial para sostenimiento de cuñas o bloques potencialmente inestables. En general el soporte es un elemento drenante, a través de la masa o como consecuencia de la fisuración por entrada en carga. El revestimiento, por su parte, se coloca con posterioridad al sostenimiento y consiste en aplicar sobre este último una capa de hormigón u otros elementos estructurales, con el fin de proporcionar resistencia a largo plazo al túnel y dar un acabado regular, mejorando su funcionalidad (condiciones aerodinámicas, impermeabilidad, luminosidad, albergar instalaciones y propiciar la estética de la obra).

En muchos países está establecido como un criterio no tener en cuenta la contribución del sostenimiento al soporte de las cargas para el cálculo del revestimiento definitivo.

Este elemento constituye la capa más interna y por tanto está expuesta al espacio libre interior del túnel. Podrá tener función estructural o no dependiendo de las condiciones asumidas en el diseño. Aunque puede o no aplicarse el revestimiento, este generalmente es necesario en la mayor parte de los túneles. Se colocan con dos fines: estructuralmente, para contener y soportar el terreno expuesto y operacionalmente, para proporcionar una superficie interna que sea adecuada a las funciones del túnel. Podemos encontrar revestimientos permanentes, cuando han sido especificados e incorporados en los cálculos de diseño, y temporales cuando los proporciona el contratista según sean necesarios para la seguridad de la construcción. Atendiendo a su extensión, el revestimiento puede ser completo (contra bóveda, hastiales y bóveda), o parcial, de no tener función estructural (paneles). En caso de necesidad, por acciones externas, el mismo debe ser continuo y cerrado. Puede además requerirse por razones de seguridad: ventilación, resistencia al fuego, a impactos, por confort, iluminación, entre otras.

Los requisitos principales que deben cumplir los revestimientos estructurales permanentes son:

- Proporcionar el apoyo estructural necesario.
- Controlar o eliminar la entrada o escape del agua.
- Ajustar la sección transversal de operación.

Las principales diferencias entre el sostenimiento y revestimiento se detallan en la Tabla 8, sin embargo es importante mencionar que el diseño del sostenimiento está definido generalmente por métodos geofísicos o geológicos y el diseño del revestimiento es completamente estructural.

Tabla 8. Principales diferencias entre Sostenimiento y Revestimiento.

Sostenimiento	Revestimiento
<p>Conjunto de elementos instalados en la excavación con función de soporte estructural (temporal)</p> <p>Elementos típicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hormigón proyectado • Bulones, cerchas y mallas 	<p>Capa interna, contigua al sostenimiento con función estructural o no, con carácter de acabado definitivo.</p> <p>Elementos Típicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hormigón proyectado • Hormigón encofrado, armado o en volumen.

Nota: Descripción entre las principales diferencias que existen entre el soporte y el revestimiento, fuente propia, 2020

3.3.2 Tipos de Sostenimiento aplicados en túneles subterráneos

3.3.2.1 Tablas, puntuales y cerchas de madera o metálicas

Estas se emplean como entibación provisional en los métodos tradicionales de excavación, consiste en un sistema flexible y barato, sin embargo presenta un alto costo en mano de obra.

El uso de estos sistemas permite excavar la sección por fases sin que se desprendan la bóveda del túnel hasta que se finaliza por completo hasta que se ejecuta el revestimiento del concreto proyectado o convencional.

3.3.2.2 Bulones y anclajes

Este es uno de los sistemas más comunes de contención de terrenos en cualquier tipo de infraestructura. Los bulones son anclajes de barra que se alojan en el interior de un talador perforado en la roca y se adhieren a esta por diferentes sistemas, trabaja de forma pasiva, esto quiere decir que entran en carga cuando el terreno se deforma.

Existen diferentes mecanismos de anclaje del terreno:

- Bulones con anclaje puntual:
 - ✓ Por cuña
 - ✓ Por cabeza de expansión

- Bulones con anclaje puntual:
 - ✓ Mecánico (torsión del tubo, presión de aire, ajuste de barra)
 - ✓ Químico (inyección de cemento o resina)

3.3.2.3 Anillo de dovelas

Cuando la excavación se realiza con máquinas tuneladoras de escudo, el sostenimiento está formado por un anillo de dovelas que se montan al abrigo de la coraza del escudo mediante el encaje de unas con otras.

Existen amplias variedades de dovelas en cuanto a geometría, tipo de juntas, conexiones, las más conocidas y utilizadas son las de planta rectangular, las cuales se ensamblan mediante tornillos, las juntas radiales y circunferenciales suelen ser lisas con unos rebajes en los que se alojan bandas de neopreno para la impermeabilización.

Tras las operaciones de sostenimiento puede ser necesario un sostenimiento secundario definitivo, llamado revestimiento, cuya misión puede ser simplemente estética, evitar infiltraciones, mejora de la ventilación o conseguir una buena iluminación.

3.3.3 Particularidades y funciones del revestimiento estructural en túneles

Para la Ingeniería Civil, el revestimiento es el elemento constructivo que recubre la estructura portante de una edificación. En túneles, es la parte estructural del sostenimiento de éstos, encargada de soportar las tensiones y mantener la integridad geométrica y estructural. Los revestimientos pueden cumplir funciones muy diversas, aunque las principales son las de aislamiento (térmico y acústico). En este ámbito se incluyen una gran variedad de soluciones, que pueden adoptarse por su nobleza decorativa, economía, facilidad de montaje, resistencia o funcionalidad. Cuando el revestimiento no resulte directamente de exigencias estructurales sus funciones serán, entre otras, facilitar la ventilación natural, garantizar la regularidad geométrica de la sección, evitar la degradación de la roca expuesta; mejorar la impermeabilización; en estos casos su espesor será el mínimo compatible con exigencias tecnológicas y en el caso de los túneles es muy común asumir el sostenimiento como revestimiento definitivo.

Estos se encuentran divididos en dos grandes grupos, de acuerdo a su carácter constructivo: continuos y discontinuos. Los primeros se extienden en grandes planos sobre la superficie a recubrir, como las pinturas o revestimientos exterior o interior del mortero y los segundos se disponen en pequeñas piezas modulares hasta completar la extensión deseada, como en los alicatados y los chapados. Al respecto Orez señala (2014) que:

Existe un revestimiento definitivo que debe garantizar el adecuado factor de seguridad o la confiabilidad establecida para la obra, absorbiendo las cargas que se estime le sean aplicadas a largo plazo, según los criterios definidos al respecto. El criterio de diseño siempre consistirá en elegir el revestimiento que mejor se adecúe a las exigencias solicitadas en el proyecto.

Para aproximarse al enorme abanico de revestimientos existentes, basta con enumerar algunos de los más usuales como alicatados, chapados de piedra, enfoscados de mortero, tablas de madera, chapas metálicas, placas estratificadas, revocos de mortero, telas adheridas, pavimentos empedrados, terrazos, hormigón continuo, asfaltados, PVC, entre otros.

3.3.3.1 Tipos de revestimiento aplicados en túneles subterráneos

3.3.3.1.1 Revestimiento sin armar

Cuando los cálculos estructurales muestran que el revestimiento está sometido a compresiones y/o a tracciones que no excedan la capacidad del hormigón, el revestimiento puede dejarse sin armar, siempre que no se necesite una alta impermeabilidad.

3.3.3.1.2 Revestimiento armado

Solo se diseña el revestimiento en túneles cuando los sostenimientos especificados no son capaces de cumplir las exigencias de proyecto o aparecen condiciones no previstas en el método empírico utilizado, estos diseños no siguen una metodología determinada.

3.3.4 Diseño del revestimiento estructural de túneles

En las pesquisas realizadas y la posterior revisión documental, se encontraron escasos estudios relativos al diseño del revestimiento, carentes en la mayoría de los casos de referentes teóricos sistemáticos sobre el tema, por consiguiente, lo que exponemos en este epígrafe constituye además una aportación del presente trabajo investigativo y práctico de la ingeniería civil en esta esfera.

En la mayoría de los países del mundo en los que se practica el revestimiento de túneles como parte de la construcción de los mismos o como una acción de conservación posterior, no existe una metodología que sistemáticamente regule el diseño del revestimiento estructural de un túnel. Alrededor del mundo se trabaja con métodos numéricos soportados en software de análisis.

En casi todos los países son los ingenieros civiles o los geólogos, que posterior a un estudio de suelos, en el que actualmente se incluyen datos referentes a los sismos y a cómo se relacionan los mismos con estas estructuras subterráneas, proponen el diseño más eficiente a seguir. Los datos obtenidos en esta investigación que anteceden a la construcción de los túneles, se introducen en diferentes softwares de modelación que automáticamente brindan los estados tensionales y de deformación en dependencia del modelo de comportamiento del suelo fijado, teniendo en cuenta todas las variables que se le proporcionan según los criterios del proyectista. Para la utilización de estos métodos se utilizan también los métodos empíricos como base para el diseño inicial. Al respecto Ordez señala (2014) que:

Gianfranco Perri - Profesor de Diseño de Túneles en la Universidad Central de Venezuela- expone que el soporte y revestimiento de los túneles deben ser diseñados de manera tal que posean un comportamiento eficiente, sean constructivamente factibles y económicamente rentables, para lo cual en principio estarán caracterizados por una forma geométrica compatible con eventuales exigencias de uso.

A pesar de las diferencias ya explicitadas entre el sostenimiento y el revestimiento, actualmente en la construcción, cada vez más, prolifera el empleo de un revestimiento único que desempeña ambas funciones, al quedar instalado definitivamente durante la etapa de excavación. Al respecto Ordez señala (2014) que:

En su tesis de grado, el ingeniero mexicano Pablo Gutiérrez (2014) expone que independientemente de la opción de revestimiento a diseñar y aplicar, las mismas deben tener en cuenta la magnitud y distribución de la presión que ejerce el suelo sobre la estructura de soporte.

Este requerimiento parte de la complejidad del fenómeno de interacción suelo revestimiento, cuya solución aproximada puede obtenerse con modelos numéricos de análisis que simulan la evolución del estado inicial de esfuerzos en el suelo durante la excavación

y la colocación del revestimiento; evolución que depende tanto de las propiedades esfuerzo-deformación de la masa de suelo como del material del revestimiento y del proceso constructivo que se siga para su colocación.

Los factores a tener en cuenta para la distribución de presiones alrededor del revestimiento son en esencia los siguientes:

- Estado inicial de esfuerzos en la masa de suelo.
- Resistencia al corte y deformabilidad del suelo.
- Procedimiento de excavación y de colocación del revestimiento primario.
- Tipo y rigidez del revestimiento primario, y del secundario en su caso
- Evolución de los esfuerzos en el suelo después de concluida la construcción.

CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE DISEÑO DE SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO POR LA METODOLOGÍA NATM

En este capítulo se presenta la propuesta de diseño de sostenimiento y revestimiento por la metodología NATM, distinto al ya aplicado en la construcción del proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima. Además se muestra el procedimiento del paso a paso a seguir para lograr que este diseño cumpla con todas las restricciones requeridas, las cuales se mencionan y se detallan a continuación.

4.1 Fundamento

En la siguiente propuesta de sostenimiento y revestimiento para el proyecto de construcción de la Línea 2 del Metro de Lima, se consideró como patrón el paso a paso del manual de diseño estructural “Steel Desing” de William T. Segui (2014), en el cual detalla el procedimiento para realizar un diseño de una sección de túnel cerrada por medio de perfiles, celosía, pernos de anclaje, platina y el recubrimiento. Así mismo, que cumpla con la verificación por pandeo, compresión axial, flexión amplificada y corte. Por último, estos datos también cumplen con los criterios del manual de estructuras del AISC y han sido verificados con ayuda de hojas de cálculos propias.

4.2 Estructura

Para la propuesta del diseño se tuvo que seguir los pasos de acuerdo al manual mencionado de Willian T. Segui, el cual se dividieron en dos partes:

- Diseño del Sostenimiento Primario
- Diseño del Sostenimiento Secundario

Cada punto cuenta con su procedimiento a seguir la cual se detalla a continuación:

- Diseño del Sostenimiento Primario:
 1. Determinar los diagramas de Fuerza Normal, Cortante y Momento Flector
 2. Diseño de la Estructura Metálica Compuesta
 3. Diseño de la Sección Armada
 4. Verificación por Pandeo y Compresión Axial
 5. Verificación por Flexión Amplificada
 6. Verificación por Corte
 7. Diseño de Conexiones Empotradas

Este punto del procedimiento cuenta también con sus respectivos pasos:

- Determinar los momentos últimos en los extremos

- Selección de una plantilla para determinar las dimensiones y ubicaciones preliminares de la platina y pernos
- Determinar el diámetro de los pernos de anclaje
- Determinar el espesor de la platina
- Verificación de la resistencia al corte de la platina
- Verificación de la resistencia al corte en pernos

8. Diseño de Armado de Celosía Simple

- Diseño del Sostenimiento Secundario:
 1. Determinar los diagrama de Fuerza Axial, Cortante y Momento Flector
 2. Diseño por Flexión
 3. Verificación por Cortante

4.3 Desarrollo

La propuesta de diseño se realizó secuencialmente según los pasos del punto anterior, cumpliendo con el manual de estructuras del AISC, la cual se detallarán a continuación:

- Diseño del sostenimiento primario:

Es el primer proceso y el más importante, ya que de acuerdo al diseño que se plantea, este soportará todas las cargas de acuerdo a su área de contacto, para eso existe una secuencia a seguir la cual se detallará a continuación:

1. Determinar los diagramas de Fuerza Normal, Cortante y Momento Flector:

Se evalúa los diagramas para poder obtener las fuerzas últimas de cada una de ellas, para luego evaluar el diseño.

Según los diagramas los resultados fueron: Fuerza Normal es 1746.88 KN, Fuerza Cortante 174.46 KN y Momento Flector 70.438 KN.

2. Diseño de la Estructura Metálica Compuesto:

En este parte se realizaron las conversiones a unidades inglesas de los resultados de cada fuerza determinada y poder realizar un prediseño para poder verificar si cumple con las restricciones de cada ecuación según el AISC, donde se determinó que la estructura metálica armada será de dos perfiles tipo canal junto a un espesor de 20 cm de concreto proyectado por 1 metro de longitud de avance.

3. Diseño de la Sección Armada:

En este punto se detalla que la sección será construida con Acero ASTM A36, la cual cumple con la ecuación del criterio de elementos compactados para determinar las dimensiones de esta.

4. Verificación por Pandeo y Compresión Axial:

En este punto es muy importante verificar la resistencia de la sección, ya que este tipo de estructura normalmente falla por pandeo flexo-torsional. Esta verificación se realiza mediante las ecuaciones de resistencia al pandeo elástico, resistencia al rendimiento y a la compresión nominal.

5. Verificación por Flexión Amplificada:

En este punto es necesario amplificar los momentos últimos obtenidos inicialmente por medio de las gráficas del punto 1, ya que por medio de esta amplificación se puede verificar si el valor cumple con la ecuación de Cargas amplificadas.

6. Verificación por Corte:

En este punto, el manual del AISC establece que el diseño de una sección compuesta por corte debe calcularse basándose bajo las siguientes premisas:

- ✓ Resistencia al Corte del Capítulo G del AISC
- ✓ Resistencia al Corte basándose sólo en la estructura del concreto bajo los criterios del ACI 318
- ✓ Resistencia al Corte Nominal del Acero del capítulo G del AISC más la resistencia nominal del acero de refuerzo según el ACI 318

Basados en estas premisas se verifica si la sección cumple con la ecuación de la resistencia nominal de corte.

7. Diseño de Conexiones Empotradas:

Las bases y conexiones del marco deberán diseñarse sistemáticamente siguiendo los pasos descritos para diseñar conexiones que admiten momento y fuerza cortante combinados, la cuales se describen a continuación:

- ✓ Determinar los momentos últimos en los extremos: Detallar los valores máximos últimos de las fuerzas normal, cortante y momentos.

- ✓ Selección de una plantilla para determinar las dimensiones y ubicaciones preliminares de la platina y pernos: Predimensionar en planta la supuesta distribución con sus respectivas medidas la sección.
- ✓ Determinar el diámetro de los pernos de anclaje: Proponer una dimensión inicial para poder ir verificando si cumple con la ecuación de resistencia de pernos en tracción y poder hallar el diámetro necesario y adecuado para la sección.
- ✓ Determinar el espesor de la platina: Proponer una dimensión inicial para poder ir verificando si cumple con la ecuación de resistencia a la flexión de conexión y poder hallar la medida del espesor necesaria y adecuada para la sección.
- ✓ Verificación de la resistencia al corte de la platina: Según los valores calculados en los puntos anteriores se podrá verificar si la sección dimensionada cumple con la ecuación de resistencia al corte de la platina para luego verificar valores de los pernos.
- ✓ Verificación de la resistencia al corte en pernos: Según los valores calculados en los puntos anteriores se podrá verificar si los datos de los pernos cumplen con la ecuación resistencia al corte en pernos.

Es importante mencionar que se deben validar cada punto ya que si uno no cumple con las ecuaciones respectivas, se tendrá que realizar la secuencia de diseño desde el inicio.

8. Diseño de Armado de Celosía Simple:

La configuración de la sección armada depende de la longitud admisible permitida en la que se pueden instalar las conexiones de celosía en cada uno de los perfiles angulares. En este caso la configuración es de celosía simple más platinas de conexión en los extremos. De esta forma se puede asegurar que el diseño de la estructura cumple con los requisitos exigidos por el Manual del AISC.

En este paso se comprueba si el dimensionamiento propuesto cumple con la ecuación de la longitud admisible para miembros armados, en

este último paso se puede observar la culminación del proceso del sostenimiento primario (sostenimiento).

- **Diseño de Sostenimiento Secundario:**

El revestimiento que se propone debe de cumplir con todas las combinaciones de cargas y exigencias del diseño de concreto armado según la norma peruana E.060. También presenta una secuencia para poder realizar el diseño la cual se presente a continuación:

1. **Determinar los diagramas de Fuerzas Axiales, Cortantes y momento flector:**
Se evalúa los diagramas para poder obtener las fuerzas últimas de cada una de ellas, para luego evaluar el diseño.
2. **Diseño por Flexión:** Según los valores prediseñados se tiene que verificar si esta cumple con la ecuación de verificación por Flexión.
Luego tal y como se ha evaluado para las secciones longitudinales de avance el diseño de las barras longitudinales quedará dictado por la cuantía mínima para el refuerzo de acero en el eje de avance. Para las barras longitudinales el diseño corresponde a un valor del 1% Ag dividido en dos secciones superiores y una sección inferior.
3. **Verificación por Cortante:** En este punto es donde se determina el espesor del sostenimiento la cual debe cumplir con la ecuación de verificación.

Para poder tener un mejor detalle de la propuesta realizada se realizó con la ayuda del programa Sketchup la simulación de la sección transversal la cual es la propuesta descrita en líneas anteriores. (Anexo 1)

4.4 Diseño del Sostenimiento Primario y Secundario

4.4.1 Diseño del Sostenimiento Primario

El diseño del sostenimiento cumplió con los requisitos de la norma el Manual del AISC 360-2011 y E.090 de Estructuras de Acero.

Análisis de Deformación y Esfuerzos del Sostenimiento Primario:

Es necesario evaluar para el método de NATM para verificar que la secuencia constructiva cumpla con las solicitaciones exigidas de esfuerzos. A diferencia de la secuencia con una tuneladora TBM, el avance es secuencial y por lo tanto el sostenimiento sufre la desventaja de tener que analizarse en cada una de sus etapas.

En primer lugar, es definir la secuencia constructiva elegida y con esta analizar cada una de las etapas en servicio. Para esto, a diferencia del análisis de la sección completa amplificada, la geometría del túnel va a variar de acuerdo al avance de construcción. Además, las solicitaciones no serán amplificadas por combinaciones de carga debido a que este sostenimiento es temporal. En la figura 49 se presenta el esquema de la secuencia constructiva del tramo en caverna.

Figura 49. Secuencia constructiva del método NATM. Fuente propia, 2020.

- Diagramas de Fuerza Normal, Cortante y Momento Flector

La primera fase del diseño es evaluar los diagramas de momento flector, fuerza cortante y fuerza normal de la estructura, la cual se muestra en la Figura 50, 51 y 52. Estos resultados permitirán obtener los estados de fuerza última que serán necesarios para el diseño. Al respecto, Chirinos (2017) señala que:

Tal como podemos apreciar los resultados de los diagramas, podemos determinar que los resultados presentan una mayor concentración de fuerza cortante y momento flector en el conector inferior de la unión de la contrabóveda con el hastial. Dicho elemento determinará el V_u y M_u de diseño: 174.46 KN y 70.438 KN.m respectivamente. Por otro lado, el valor de P_u se concentra con mayor incidencia en el hastial central y tiene un valor máximo de 1746.88 KN.

Figura 50. Diagrama de Momento Flector. Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020

Figura 51. Diagrama de Fuerza Cortante. Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020.

Figura 52. Diagrama de Fuerza Normal. Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” Chirinos. 2020.

- Diseño de Estructura Metálica Compuesta

Para este caso se realizó las conversiones respectivas que se muestran en la Tabla 9 donde se mencionan las fuerzas y momentos últimos utilizando las unidades inglesas.

Tabla 9. Conversión de unidades de propiedades del sostenimiento

Propiedades del Sostenimiento		
Ec	4018	Ksi
Es	29000	Ksi
F _y	36	Ksi
F _c	5	Ksi
Mu	623.43	Kips * in
Pu	392.71	Kips
Vu	39.22	Kips

Nota: Valores obtenidos de acuerdo a los diagramas que se realizaron en el estudio de tesis “Diseño Geotécnico de 1 Km de Túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao”, fuente propias, 2020.

El diseño de esta estructura compuesta comprende una estructura metálica armada de dos perfiles tipo canal sumergida centralmente en concreto proyectado de 20 cm de ancho por

1 metro de longitud de avance. Esta sección típica se deberá diseñar considerando los criterios del manual de estructuras metálicas del AISC.

- Diseño de la Sección Armada

La sección armada se construirá con Acero ASTM A36 por el método de LRFD de la AISC, está deberá cumplir en primer lugar con el criterio de estructura compacta para perfiles angulares, en la Figura 53 se observa que los resultados cumple con la Ecuación A1, la cual se observa a continuación:

$$\frac{b}{t} < 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Ecuación A1: Criterio de Elementos Compactados

Donde:

b = ala del perfil angular (3 pulgadas)

t = espesor del ángulo (0.27 pulgadas)

F_y = Límite de fluencia

E= Módulo de elasticidad

b/t = 10.99

Escogiendo 2 perfiles tipo canal 3x1.38x0.27 pulgadas

Sección Peralte x Peso Nominales	Peso	DIMENSIONES						PROPIEDADES												
		Peralte	Espesor del Alma	Patin		k	T	Área	e0	Eje X-X				Eje Y-Y				J		
				Ancho	Espesor					I	S	r	Z	I	S	r	$\bar{x}$		Z	
(in X lb/ft)	(kg/m)	d	t _w	b _f	t _f	(mm)	(mm)	(cm ²)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm ³)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm ³)	(cm ⁴)		
C 3 X 3.5	5.21	76.2	3.35	34.8	6.93	17.5	41.3	6.65	1.25	65.3	17.0	3.05	20.3	7.03	2.98	1.00	1.13	5.96	0.94	
C 3 X 4.1	6.10	76.2	4.32	35.8	6.93	17.5	41.3	7.81	1.17	68.7	18.0	2.97	21.6	7.95	3.21	1.01	1.11	6.54	1.12	

Figura 53. Dimensiones de la sección armada, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.

- Verificación por Pandeo y Compresión Axial

Es necesario evaluar la resistencia de la sección a la compresión, debido a que la estructura compuesta normalmente falla por pandeo flexo-torsional, en la Figura 54 se evalúa lo mencionado. Las ecuaciones empleadas han sido sacadas del (AISC 2011: I2) para determinar la verificación por pandeo y compresión axial del diseño propuesto.

El primer paso a seguir es hallar el coeficiente para el cálculo de la rigidez efectiva de una sección compuesta embebida en compresión (C_1), la cual su fórmula se puede observar en la Ecuación A2.

$$C_1 = 0.1 + 2 \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.3$$

Ecuación A2: Resistencia al Pandeo Elástico para una sección compuesta

A_s = Área de sección transversal del acero (7.81)

A_c = Área del concreto (300)

C_1 = 0.1507

Con el dato de C_1 se puede observar que cumple con la restricción $0.1507 \leq 0.3$

El segundo paso a seguir es hallar la resistencia a la compresión nominal según las ecuaciones A3 y A4.

$$P_{no} = F_y \cdot A_s + F_y \cdot A_{sr} + 0.85F'_c \cdot A_c$$

Ecuación A3: Resistencia de Rendimiento a la Compresión

$$P_n = P_o \left[0.658^{\frac{P_{no}}{P_e}} \right]$$

Ecuación A4: Resistencia a la Compresión Nominal

P_{no} = Resistencia de Rendimiento a la Compresión

A_{sr} = Área de acero de refuerzo

F'_c = Resistencia a la Compresión de diseño

P_e = Carga de Pandeo

P_n =	1016.39269	Kips
ϕP_n	762.294521	> 392.71

Figura 54. Verificación por Pandeo Compresión Axial, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.

- Verificación por Flexión Amplificada

En el Manual del AISC establece la necesidad de amplificar los momentos últimos en los casos que exista una combinación del momento con fuerzas axiales.

$$M_r = B_1 \cdot M_{nt} + B_2 \cdot M_{lt}$$

Ecuación A5: Amplificación del Momento

Es importante mencionar que $B_2 = 0$ ya que este análisis no cumple para amplificación de estructuras soportadas en distintos niveles. Por otro lado el valor de B_1 se podrá hallar el valor según la Ecuación A6.

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{P_r}{P_{e1}}} \geq 1$$

Ecuación A6: Factores de amplificación

C_m = se determina mediante análisis o se adopta conservadoramente el valor 1 en todos los casos.

P_r = Carga vertical a estabilizar

P_{e1} = Carga de pandeo de Euler

M_{nt} = Momento máximo en la sección

$B_1 = 1.3432$

Con el dato de B_1 se puede observar que cumple con la restricción $0.13432 \geq 1$

Por último, en la Figura 55 se verifica si la flexión amplificada es mayor al momento último.

M_n	1421.957	Kips x in
ϕM_n	1279.762	> 623.43

Figura 55. Verificación por Flexión Amplificada, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.

- Verificación por Corte

En el caso del diseño del sostenimiento, se realizó el cálculo según el capítulo G2 del AISC, la cual se observa en la Ecuación A7.

$$V_n = 0.6F_yA_wC_v$$

Ecuación A7: Resistencia Nominal de Corte

A_w = Área a calcular (15.62 pulgadas cuadradas)

C_v = Esfuerzo crítico de corte (1)

Por último, en la Figura 56 se verifica si la resistencia nominal al corte es mayor al cortante último

V_n	337.258	Kips
ϕV_n	252.9	> 39.22

Figura 56. Verificación por Corte, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.

- Diseño de Conexiones Empotradas

El manual de Segui redacta claramente los pasos a seguir para el diseño de estas uniones (Segui 2013: 561).

1. Se determinan los momentos últimos en los extremos, en el caso del sostenimiento de los arcos se tomará los valores críticos que se observan en la Tabla 10.

Tabla 10. Solicitaciones en las conexiones sostenimiento primario

Fuerzas y Momentos en Conexiones		
Mu	623.43	Kips * in
Pu	392.71	Kips
Vu	39.22	Kips

Nota: Datos del momento y cortante de la sección analizada, fuente propia, 2020.

2. Se selecciona una plantilla de diseño de prueba de las conexiones, donde se determina las dimensiones y ubicaciones preliminares de la platina y pernos, en la Figura 57, se observa el diseño de la sección planteada:

Figura 57. Diseño de la sección. Fuente propia, 2020.

3. Determinar el diámetro de los pernos de anclaje, según la Ecuación A8 que se observa a continuación:

$$d_b = \sqrt{\frac{4M_u}{3\pi F_t h_1}}$$

Ecuación A8: Resistencia de Pernos en Tracción

d_b = Diámetro del perno

M_u = Momento último

F_t = Tensión de tracción máxima de un perno

h_1 = longitud del perno

Para el diseño se pueden usar tanto pernos de clase A (A325/F1852) como clase B (A490/F2280), en la Figura 58, se observa la verificación de los diámetros de los pernos a utilizar.

d_b	0.748	<	0.75
d_b elegido	3/4"		

Figura 58. Diseño de diámetros de pernos, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.

4. Se determina el espesor de la platina utilizando la Ecuación A9 que se observa a continuación:

$$0.9F_y t_p^2 Y_p = \phi M_n$$

Ecuación A9: Resistencia a la Flexión de Conexión

t_p = Espesor final de la platina

Y_p = Rendimiento mecánico

ϕ = Factor de resistencia (0.90)

En la Figura 59 se observa el espesor de la platina a utilizar, la cual cumple con las Ecuación A8 planteada líneas anteriores.

t_p	0.737	<	0.875
T_p elegido	7/8"		

Figura 59. Diseño de espesor de platina A36, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.

5. Verificación de la resistencia al corte de platina según la Ecuación A10:

$$\phi R_n = 0.9 * 0.6 F_y * t_p * b_p \geq \frac{F_{fu}}{2}$$

Ecuación A10: Resistencia al Corte Platina de Conexión

R_n = Resistencia nominal

t_p = Espesor de platina

b_p = Ancho de platina

F_{fu} = Resistencia al corte

En la Figura 60 se observa la resistencia al corte de la platina a utilizar, la cual cumple con las ecuaciones planteadas líneas anteriores.

$F_{fu}/2$	56.68	Kips	
ϕR_n	100.27	>	56.68

Figura 60. Resistencia al corte de platina, hoja cálculo. Fuente propia, 2020.

6. Verificación de la resistencia al corte en pernos según la Ecuación A11:

$$V_u \leq \phi R_n$$

Ecuación A11: Resistencia al Corte en pernos

R_n = Resistencia nominal

V_u = Carga máxima de corte

En la Figura 61 se observa la verificación de la resistencia al corte de los pernos a utilizar, la cual cumple con las ecuaciones planteadas líneas anteriores.

V_u	39.22		
ϕR_n	68.71	>	39.22

Figura 61. Verificación de la resistencia al corte en pernos, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.

- Diseño de Armado de Celosía Simple

En la Ecuación A12 se determina el valor máximo de t para determinar la longitud diagonal de la celosía.

$$\frac{K * L}{0.289 * t} \leq 140$$

Ecuación A12: Longitud Admisible para miembros armados

t = Longitud diagonal de celosía

K = Factor de longitud efectiva

L = Efecto de carga para combinación de cálculo

A partir de esta relación se ha determinado que el valor de a es menor a 29.4". Sin embargo, dado que la exigencia para miembros de celosía simple exige un valor menor de 15". Se ha adoptado tener una separación máxima de 12" entre cada miembro de armado. En la Figura 62 se observa el diseño de celosía a utilizar, la cual cumple con la ecuación planteada líneas anteriores.

t	0.370		
Ecuacion A11	121.575	<=	140
t elegido	3/8"		

Figura 62. Diseño de celosía simple, hoja de cálculo. Fuente propia, 2020

4.4.2 Diseño del Sostenimiento Secundario

El revestimiento que se analizó cumple con las combinaciones de cargas y las exigencias del diseño de concreto armado de la norma peruana E.060.

A continuación, presentaremos los diagramas de momento flector y fuerza cortante y axial de la sección completa del revestimiento.

- Diagramas de Fuerza Axial, Cortante y Momento Flector

En las Figuras 63, 64 y 65 se muestran los diagramas de fuerzas axiales, cortantes y de momentos flectores respectivamente del revestimiento secundario.

Figura 63. Diagrama de Fuerzas Axiales Revestimiento Secundario, Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020.

Figura 64. Diagrama de Fuerzas Cortantes Revestimiento Secundario, Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020.

Figura 65. Diagrama de Momento Flector Revestimiento Secundario, Adaptado de “Diseño Geotécnico de 1Km de túnel para la Línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao” por Chirinos V. 2020.

- Diseño por Flexión

El diseño por flexión se realiza evaluando la flexión máxima para una sección típica de 1 metro de ancho, en la Figura 66 se muestra esta verificación por flexión, según la ecuación A13.

$$\phi M_n = A_s F_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Ecuación A13: Verificación por Flexión

A_s = Área de sección transversal del acero

d = distancia entre ejes

a = Espacio libre de refuerzos

M_n = Resistencia a la flexión nominal

Mu	46.88	Tn/m	
ϕM_n	52.117	>	46.88

Figura 66. Verificación por Flexión., hoja de cálculo. Fuente propia, 2020.

- Verificación por Cortante

Se puede apreciar la necesidad de un ensanchamiento (d) en las esquinas de 40 cm mínimo dado que la resistencia del concreto a la fuerza cortante debe cumplir con la Ecuación A14. Este ensanchamiento se realiza en la esquina inferior que conecta la contrabóveda con los hastiales del revestimiento, en la Figura 67 se muestra esta verificación por cortante la cual cumple con lo requerido.

$$\phi V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} \left(1 - \frac{0.29 N_u}{A_g} \right) b_w * d \geq V_u$$

Ecuación A14: Verificación por Cortante

V_c = Fuerza Cortante

F'_c = Resistencia a la Compresión de diseño

N_u = Fuerza de tracción

V_u = Fuerza cortante máxima

b_w = Distancia promedio (1)

d = Ensanchamiento de las esquinas

V_u	63.384	T_n	
ϕV_c	64.99	>	63.384

Figura 67. Verificación por cortante, hoja cálculo. Fuente propia, 2020.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presenta los resultados que se obtuvieron en todo el proceso de investigación de analizar los métodos constructivos con el fin de asegurar la viabilidad de los métodos constructivos en lo que es la excavación de túneles urbanos.

5.1 Verificación de resultados

5.1.1 Describir los distintos procesos de excavación en proyectos de túneles subterráneos

En resumen, la construcción de una línea de Metro puede realizarse mediante el método NATM o el uso de máquinas tuneladoras como se vino mencionando en los anteriores capítulos, incluso se puede utilizar ambos métodos en distintos tramos, tal como se realiza en la construcción de la Línea 2 del Metro de Lima, donde 9 km de la primera etapa son construidos con NATM mientras que la segunda etapa de 26 km se espera la construcción por dos tuneladoras (EPB y SLURRY).

Ambos métodos trabajan con el mismo objetivo, excavar la sección del túnel minimizando los riesgos de inestabilidades y deformaciones en superficie, pero lo hacen con técnicas muy diferentes, por un lado el método NATM considera al terreno como parte del soporte y permite su deformación controlada mientras se aplica el sostenimiento por cerchas y shocrete (concreto proyectado) y por otro lado el escudo de balance de presión

de tierras o EPB y SLURRY, que excava la sección completa del túnel aplicando una presión del confinamiento a través del mismo suelo excavado y tratado con aditivos. Estas diferencias conceptuales se traducen en una serie de otras diferencias que se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparación de la implementación del método NATM y TBM.

CONCEPTO	NATM	TBM
Sección Transversal	Ovalada, aprox. 70 m ²	Circular, aprox. 80 m ²
Sostenimiento	Marcos reticulados, malla y shocrete	Anillo de hormigón prefabricado (dovelas)
Eliminación de escombros	En todo los piques, mediante camiones	Solo un acopio en el portal, mediante cintas transportadoras
Inversión en maquinaria	Pequeña	Grande, sobre los 25 millones de dólares para la máquina
Obras previas	Piques e instalaciones de faena	Estaciones, fabricación de dovelas e instalaciones de soporte

Terrenos necesarios	Terrenos para las estaciones y cada uno de los piques de construcción	Terreno para las estaciones y un gran terreno para las instalaciones de faena
Tipo de estaciones	Cavernas	Preferencia Cut and Cover, pero puede ser cavernas también
Número de contratistas	Varios contratistas, uno para cada tramo	Pocos contratistas, es rentable para tramos largos

Nota: Se observa un resumen de las características de los métodos a trabajar en la línea 2 del metro de lima, fuente propia, 2020.

- **Discusión:**

En la actualidad con el avance tecnológico y la necesidad de implementación de construcciones, se ha generado una gran demanda de fabricación de máquinas tuneladoras en el mercado, con diversos tamaños y tipos de acuerdo al requerimiento para la construcción de un túnel, como resultado a lo mencionado, existen las TBM o Topos que son utilizadas para la excavación de túneles, los cuales son más las eficientes para terrenos con distinto tipo de suelo con presencia o no de nivel freático.

La selección de uno de estos tipos de tuneladoras depende de un buen estudio de suelos en donde se ejecuta el proyecto, pues de este modo no se tendrá ningún inconveniente durante la construcción, en el caso que la selección de la tuneladora no sea la más adecuada al terreno los resultados no serán los esperados, provocando que los costos y plazos de ejecución se incrementen excesivamente.

Por otro lado, el suelo de Lima es uno de los factores claves en la utilización del método NATM en la construcción de la Línea 2 del Metro de Lima. Las gravas que presenta dicho suelo tienen un buen comportamiento mecánico que permite aplicar métodos de excavación convencional donde el suelo forma parte del arco resistente total, con apoyo de un sostenimiento adicional formado por cerchas de acero y shocrete.

Con los conocimientos adquiridos por varios años sobre el comportamiento del suelo ante este tipo de construcciones, se ha podido implementar el método NATM utilizando maquinaria liviana, combinando técnicas de shotcrete e instalados en secciones parciales (bóveda, banco y contrabóveda) logrando un avance con mínimas deformaciones en superficiales.

Por último, Cada uno de estos métodos tienen sus propias características en sus procesos constructivos, como en tiempo y costo, un ejemplo de esto se tiene que el costo del uso de una tuneladora es aproximadamente 18 000 dólares por metro lineal, mucho más que al usar el método NATM la cual cuesta 15 000 dólares por metro lineal, lo cual no garantiza que uno sea mejor que otro, ya que cada uno presentan cualidades propias, una de ellas en el método austriaco es que presenta varios frentes de trabajo la cual se pueden trabajar en simultaneo a comparación de la tuneladora que esta solo presenta un solo frente de trabajo por la cual es monótono, en términos de tiempo cada uno de estos métodos presentan variaciones depende al área de trabajo, hasta en algunos casos presentando una igualdad en tiempo ya que siempre en plena construcción se presentan incertidumbres.

5.1.2 Describir las obras preliminares para frentes de excavación del método NATM

Para este capítulo se investigó las distintas fases que se deben de considerar en la excavación del túnel ejecutado por la metodología NATM en el proyecto de la Línea 2 del metro de lima. Teniendo en cuenta todo lo necesario para el sostenimiento y el revestimiento que se va necesitar en la construcción de este. Lo cual, nos sirvió para el estudio de plantear un sostenimiento y revistiendo en partes de la sección tipo caverna que se está haciendo hoy en día en el proyecto y para ellos nos basamos al tipo de recubriendo y sostenimiento que se está aplicando, cambiándolo por perfiles tipo canal sumergida en concreto y revestimiento final con un peralte de 40.40cm de concreto proyectado, que a diferencia del que se está aplicando (30cm).

- **Discusión:**

Las estaciones, piques y galerías, forman parte de las obras previas que deben iniciarse antes de la excavación de los túneles subterráneos, pues estas estructuras

se hacen que sea posible el acceso al lugar donde se ubica el trazado y donde comienza la excavación de los túneles. Por lo general, las estaciones se construyen en forma paralela con los túneles, sin interferir unos con otros, ya que cada obra solo conecta una con otra. En consecuencia, las galerías y piques dan lugar a los frentes de trabajo de los túneles, siendo por allí el ingreso de personas, maquinarias, materiales de construcción y siendo los lugares por donde se va retirar todo el material excavado.

5.1.3 Describir el tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en túneles subterráneos

El reconocimiento del tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en el proyecto de la Línea 2 de Metro de Lima consiste en la aplicación de medidas de sostenimiento que se aplica mientras se produce la deformación e inestabilidad típica posterior a la excavación en la dirección longitudinal de avance del túnel, con la finalidad de conseguir su efectividad durante la restricción tensional.

En el caso que se produzcan roturas en el techo incluso antes que se haya aplicado el concreto proyectado, se requieren medidas de sostenimiento por delante del frente. Dependiendo de las condiciones del terreno, se emplea el revestimiento provisional del techo o paraguas, placas de acero, pernos inyectados, etc.

La colocación de bulones en el túnel se realiza una vez ha sido excavada una longitud determinada del mismo. Esta longitud depende de las características geológicas del terreno. Por otro lado, el bulonado debe realizarse sin dejar pasar mucho tiempo después de la excavación.

- **Discusión:**

Durante el reconocimiento del tipo de revestimiento y sostenimiento que se está empleando en la Línea 2 del Metro de Lima, la pregunta que se hizo fue si esta es una de las mejores empleadas para este proyecto, para esto la manera de poder verificar si es la óptima es dando estudios tanto del suelo como la deformación del área excavada, ya que como este proyecto implica una excavación subterránea, esta tendrá deformaciones por toda su sección, en la cual los estudios arrojaron

que el diseño que se está usando puede soportar las deformaciones existentes en esa zona excavada.

5.1.4 Proponer un diseño de sostenimiento y revestimiento por la metodología NATM, distinto al ya aplicado en la construcción del proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima

La propuesta de un diseño para el sostenimiento y revestimiento detallado en esta tesis fue realizada cumpliendo con los requisitos de la norma el Manual del AISC 360-2011 y E.090 de Estructuras de Acero.

Estas secciones en la cual son de tipo canal puede ser una de las alternativas de construcción para el sostenimiento y revestimiento para futuras construcciones de túneles subterráneos, ya que así se pueda salir de lo cotidiano y poder tener un lado de mejora y capacidad de poder seguir implementando nuevos sistemas y métodos de sostenimiento y revestimiento en túneles.

- **Discusión:**

Para la propuesta de un nuevo diseño de sostenimiento y revestimiento se tuvo que tomar en cuenta que todos los parámetros cumplan con la norma el Manual del AISC 360-2011 y E.090 de Estructuras de Acero.

Se trata de una sección de tipo canal para el sostenimiento la cual pueda remplazar los bulones como se está usando hoy en día para la construcción del primero tramo de la Línea 2 del metro de Lima, esta pueda que sea otra manera de poder avanzar y con la seguridad de seguir con la excavación de un tramo para futuras construcciones.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

1) Describir los distintos procesos de excavación en proyectos de túneles subterráneos.

- Para secciones de túneles más cortas, generalmente menor a 2 km, con geometría variable y en condiciones de terrenos mixtos, el método NATM proporciona procedimientos más rentables, flexibles y seguros. En comparación con túneles realizados por TBM, reduce los largos y costosos procesos de movilización y con el Cut & Cover, minimiza el impacto al medio ambiente, ya que evita la interrupción de la superficie.
- En las secciones tipo Caverna como la Cut & Cover son excavadas en diferentes etapas, lo cual consecuentemente afecta el rendimiento de construcción de túneles.
- El método Bernold y Alemán son otros tipos de métodos de excavación la cual en particular son utilizados cuando se presenta un terreno muy malo, la cual es necesario realizar un avance por etapas, esto brinda una mayor seguridad pero muy poco rendimiento en el avance.

2) Describir las obras preliminares para frentes de excavación del método NATM

- El método NATM funciona en cualquier terreno con una sobrecarga mínima, es por ello que es muy adecuado su uso para túneles con entornos urbanos, además de que presenta un calendario de construcción (obras preliminares) altamente confiable con mínimas restricciones.

- Las obras preliminares son muy importantes, como los piques de construcción, ya que gracias a este, el método NATM puede tener varios frentes de trabajo, la cual no interfiere con los accesos en la superficie, reduciendo así el impacto en el avance.
- El uso del concreto proyectado es una de las partes más importantes durante el proceso de sostenimiento y revestimiento, ya que este concreto ayuda a mejorar la estabilización en las excavaciones, evitando eficazmente el desplazamiento de las paredes excavadas.

3) Describir el tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en túneles subterráneos

- Existen varios tipos de sostenimiento aplicados para túneles subterráneos la cuales son:
 - ✓ Tablas, puntuales y cerchas de madera o metálicas
 - ✓ Bulones y anclajes
 - ✓ Anillo de dovelas
- Existen varios tipos de revestimiento aplicados para túneles subterráneos la cuales son:
 - ✓ Revestimiento sin armar
 - ✓ Revestimiento armado
- Para saber qué tipo de sostenimiento y revestimiento utilizar se debe de tener en cuenta muchas cosas, una de ellas y la más importante es el tipo de suelo en el cual se realizará el proyecto, otra es el alcance que se tiene del proyecto ya que cada tipo de sostenimiento, revestimiento mencionados presentan sus propios beneficios y costos, que se tendrá que evaluar en un proyecto para poder determinar cuál de ellos se debe utilizar.

4) Proponer un diseño de sostenimiento y revestimiento por la metodología NATM, distinto al ya aplicado en la construcción del proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima

- Para la propuesta de diseño se siguió pasos secuenciales, tanto para el sostenimiento primario y secundario, estos fueron sacados del manual titulado “Steel Desing” de Willam T. Segui, la cual nos brinda toda la información necesaria y

detallada para el planteamiento de nuestro diseño. Además, los resultados del diseño de cada procedimiento han sido verificados mediante las ecuaciones planteadas en cada paso, además de cumplir con el manual de estructuras del AISC.

- El diseño comprende una estructura metálica armada de dos perfiles tipo canal sumergida centralmente en concreto proyectado de 20 cm de ancho por 1 metro de longitud de avance.
- Es muy importante tener en cuenta las verificaciones, ya que al no cumplir con cualquier punto del procedimiento esta sección es inutilizable. Es por ello, que cada resultado óptimo permite seguir con la secuencia de diseño y el que no, hace que se vuelva a diseñar desde el paso inicial.

CAPÍTULO 7. RECOMENDACIONES

1) Describir los distintos procesos de excavación en proyectos de túneles subterráneos

- Para realizar un proyecto se recomienda tener un amplio conocimiento con respecto a todos los procesos de excavación que existen en la actualidad, ya que esto permite tener un mejor alcance para el proyecto generando grandes beneficios según al proceso que se escoja.
- Cada proceso de excavación presenta sus condiciones de uso como por ejemplo, de acuerdo al tipo de suelo en donde se realizará el proyecto, la longitud, etc. Es por ello que se recomienda realizar un estudio preliminar para poder determinar qué proceso se puede realizar en el proyecto, la cual garantice la seguridad y productividad en la excavación.
- Se recomienda no limitarse a usar en un proyecto solo un proceso, ya que en la actualidad gracias al avance tecnológico se puede utilizar un proceso tradicional y por otra sección del proyecto un tipo de tuneladora con las especificaciones que se requiera, como en el caso tratado en esta tesis, la Línea 2 del Metro de Lima se está empleando el NATM y dos Tuneladoras (TBM).

2) Describir las obras preliminares para frentes de excavación del método NATM

- Es recomendable reconocer en los frentes de trabajo cada uno de las obras preliminares, ya que permite tener una proyección del inicio de la excavación mediante el NATM.

- Para proyectos de gran envergadura es recomendable definir como se realizarán e iniciarán las obras preliminares, ya que se debe tener en cuenta los accesos en la superficie, la cual no deben interferir con vías, tránsito, peatones, etc.
- Se recomienda para los proyectos subterráneos, tomar en consideración el uso del concreto proyectado, ya que sus beneficios y propiedades son totalmente más óptimos en comparación al concreto convencional.

3) Describir el tipo de sostenimiento y revestimiento aplicado en túneles subterráneos

- Se recomienda conocer todos los tipos de sostenimiento existentes en la actualidad, ya que cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas de acuerdo al frente de trabajo.
- Es recomendable realizar los cálculos estructurales preliminares necesarios para poder determinar si en el proyecto se debe utilizar un revestimiento sin armado o armado, ya que de esto depende realizar un diseño de sostenimiento secundario para el proyecto.
- Se recomienda que para el diseño de un sostenimiento, revestimiento se analicen y se tomen por separado, porque cada uno de ellas tienen sus propias funciones, propiedades y solo pueden ser considerados iguales en razones económicas.

4) Proponer un diseño de sostenimiento y revestimiento por la metodología NATM, distinto al ya aplicado en la construcción del proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima

- Se recomienda profundizar en temas estructurales especializados para el diseño de concreto reforzado de las estructuras subterráneas. Esta tecnología en muchos casos permitirá mejores respuestas frente al comportamiento del concreto y en consecuencia, la mejora en la resistencia, lo cual hará más competente el diseño de los sostenimientos y revestimientos que podrían plantearse.
- Es recomendable conocer bien los programas en los cuales se puede modelar el comportamiento del terreno en el cual se va a llevar a cabo la construcción del

proyecto en cuanto a sus perfiles geotécnicos, con el propósito de poder modelar con exactitud el diseño.

- Para temas de diseño estructural como es en el caso del sostenimiento y revestimiento se recomienda tener siempre en cuenta que todos estos datos cumplan con el manual ya antes mencionado “Steel Desing” de William T. Segui, por otro lado, la verificación del concreto se debe realizar mediante la Norma E.060.

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, A. (2018). *Procedimientos de excavación y sostenimiento de túneles proyecto de derivación Huascacocha – Rímac*. (Tesis de título profesional, Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú.)
- Aguilar, R. (2018). *Estudio de prefactibilidad de la construcción de túneles subterráneos en Lima Metropolitana*. (Tesis de investigación, Pontificia Universidad Católica Del Perú, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú.)
- Aldesa. (2014). Construcción de Túnel Puruchuco, distrito de Ate, provincia, departamento de Lima, recuperado de <http://lima.pe/lima/obras/municipalidad-de-lima-túnel-puruchuco-ate-8647238>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Alvárez, R. J. (2006). *Parametrización del Gálbo de Material Ferroviario* (Tesis de doctorado, Universidad Carlos III de Madrid, Facultad de Ingeniería. Leganés, España). Recuperado de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/782/Tesis_Deposito_2206.pdf [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Bakker, K. Leendertse, W. (marzo, 1999). Monitoring: Evaluation of Stresses in the Lining of the Second Heinenoord Tunnel. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 197-202. Recuperado de https://www.issmge.org/uploads/publications/6/9/1999_029.pdf . [Consulta: 22 de marzo de 2020].

- Baxter, A., Hilton, A., & Nye, J. (1991). Sydney Harbour Tunnel--Driven and Cut-and-Cover Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 6, 227-233. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(91\)90070-K](https://doi.org/10.1016/0886-7798(91)90070-K)
- Björn Kufver. Research on the specific aspects of tilting. *World Congress on Railway Research* 2001 Köln Germany.
- Carrillo, A. (1989). Los suelos de Lima y la cimentación de vivienda. Recuperado de http://www.acingenieros.com/descargas/pdfs/Articulo_03_Parte_02.pdf [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Castresana, L. (2016). Análisis comparativo de metodología de sostenimiento de túneles. (Maestría Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica, Universidad de Oviedo. Oviedo, España). Recuperado de http://dibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/38203/6/TFM_%20Leire%20Castresana%20Gonz%C3%A1lez.pdf / [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Chambon, P. (1994). Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face. *Geotechnical Engineering*, 120(7), 1148-1165. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:7(1148)
- Chao, Y. (2016). Discussion on the Development of Underground Utility Tunnels in China. *Procedia Engineering*. (165) 540-548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.698>
- Chen, X. (2017). Research on Combined Construction Technology for Cross-Subway Tunnels in Underground Spaces. *Engineering*, 4, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.08.001>
- Chirinos, V. R. (2017). *Diseño Geotécnico de 1KM de túnel para la línea 2 de la Red Básica del Metro de Lima y Callao* (Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería. Lima, Perú). Recuperado de <file:///C:/Users/hp/Desktop/TESIS%202018-1/tesis%20chirinos.pdf> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Construcción Pan-Americana. (s.f.). El moderno Túnel Néstor Gambetta. Lima. Recuperado de <http://www.construccion-pa.com/noticias/peru-el-moderno-tunel-nestor-gambetta/> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Directriz del C. (1999). Leyes de los Estados Relacionados con la aprobación de tipo de construcción. *Parlamento y Consejo Europeo*. (Acta de Normativas de Túneles Urbanos Barcelona, España.)

- Du, B., Du, Y., & Xu, F. (2018). Conception and Exploration of Using Data as a Service in Tunnel Construction with the NATM. *Tunnel Engineering*, 4, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.07.002>
- Editorial Autoridad Autónoma del Sistema eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao (AATE). (s.f.). *Primera línea de Metro Subterráneo*. Lima: AATE. Recuperado de <https://www.aate.gob.pe/linea-2/> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Editorial Municipalidad de Lima. (2016). Demanda por estaciones de la Línea 1 del Metro de lima. Como vamos en movilidad, Recuperado de <http://lima.pe/lima/obras/municipalidad-de-lima-demanda-estaciones-linea1-243879> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- FCC Construcción. (2018). Túnel de Cabrera. <https://www.fccco.com/documentos/265311/321405/T%C3%BAneles>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Francisco Ortiz América Noticias. (2016). *MML: Túnel de Benavides será el más moderno del país*. Lima: Santiago de Surco. Recuperado de <http://www.america.com.pe/noticias/actualidad/tunel-benavides-mas-moderno-pais-n242127> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- G. Schupp. Computational bifurcation analysis of mechanical systems with applications to railway vehicles. *Vehicle System Dynamics* 41. pp 458–467. 2004.
- González, V. C (2016). Estudio de prefactibilidad para la construcción de tuneles de metro mediante máquinas tuneladoras. (Tesis de licenciatura, Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Santiago de Chile, Chile)
- H. True. Does a critical speed for railroad vehicle In *Proceedings of the 1994 ASME/IEEE Joint Railroad Conference*. pp. 125–131. 1994.
- Inostroza, L. (2017). Informal urban development in Latin American urban peripheries. Spatial assessment in Bogotá, Lima and Santiago de Chile. *Landscape and Urban Planning*, 165, 267-279. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.03.021>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2010). *II Censo Nacional Universitario*. Lima: INEI. Recuperado de http://censos.inei.gob.pe/cenaun/redatam_inei/ [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Juan Arellano Valdivia Diario Correo (2017). Proyecto Vía parque Rímac. Recuperado de <http://diario.correo/lima/obras/video-municipalidad-de-rimac-noticia-25768>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].

- Kamata, H. M. (2003). Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting. *Tunnelling and Underground Space Technol*, (18), 205-212. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00029-4)
- Kiyoshi Kishida, Y. c. (2016). Discussion on the mechanism of ground improvement method at the excavation of shallow overburden tunnel in difficult ground. *Underground Space*, (1) 94-107. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2016.11.003>
- Leronymaki, E., Whittle, A., & Einstein, H. (2018). Comparative study of the effects of three tunneling methods on ground movements in stiff clay. *Tunnelling and Underground Space Techonology*, 74, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.01.005>
- López, J. J. (2015). *Análisis de los Parámetros del Gálibo Ferroviario a Escala*. (Tesis de Licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, Facultad de Ingeniería. Leganés, España). Recuperado file:///C:/Users/hp/Desktop/TESIS%202018-1/9%20CICLO/TESIS%202018-1/Analisis%20de%20los%20parame-tros%20de%20lo%20g%C3%A1libos.pdf [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Marcio Muniz de Farias, A. H. (2004). Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (19) 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2003.11.006>
- Martinez, J. (2011). *Análisis del concreto lanzado como revestimiento definitivo para túneles*. (Tesis de investigación, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia.)
- Ministerio de Transporte y comunicaciones (MTC). (2013). *Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área Metropolitana de Lima y Callao*. Lima: MTC. Recuperado de: file:///G:/TESIS%202018-1/01%20-%20EI%20JR13012%20Resumen.pdf [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Ministerio de Transporte y comunicaciones (MTC). (2016). *Manual de carreteras: Túneles, muro y obras complementarias*. Lima: MTC. Recuperado de: https://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20de%20Tuneles%20y%20Obras%20Complementarias%20Aprobado%20RD%2036.pdf [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Ministerio del Ambiente (MA). (2012). *Mapa de suelos en los distritos de Lima*. Lima: MA. Lima: MA. Recuperado de: <http://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-suelos-districtos-lima> [Consulta: 22 de mayo de 2020].

- Ministerio del Ambiente (MA). (2018). *Pronostico y temperatura actual para Lima Metropolitana*. Lima: MA. Recuperado de: http://senamhi.gob.pe/?p=pronostico_lima [Consulta: 22 de marzo de 2020]
- Miranda, J. (27 de enero de 2014). EMB Construcción: Línea 3 y 6 del Metro de Santiago [Entrada en blog]. Recuperado de <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=177&tip=4&xit=lineas-3-y-6-del-metro-de-santiago-nuevos-desafios-para-un-mejor-servicio> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Mostafa Sharifzadeth, F. K. (2013). Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground – Niayesh tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (35) 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.01.002>
- Pilinio, G. &. (2012). Nonlinear analysis of NATM tunnel construction with the boundary element method. *Computers and Geotechnics*, (40) 160-173. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.10.005>
- Plinio G.C (2002). Proceso de excavación NATM by Computers and Geotechnics, 29, 73 – 94. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(01\)00020](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(01)00020).
- Rodríguez, J. F. (18 de febrero de 2012). ¿Cuánto tiempo de tu vida pasas en el transporte público? El comercio. Recuperado de <http://archivo.elcomercio.pe/sociedad/lima/cuanto-tiempo-tu-vida-pasas-transporte-publico-noticia-1376315> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- RPP Noticias. (2017). *Municipalidad de Lima inauguró el túnel Benavides en Surco*. Lima: Municipalidad de Lima. Recuperado de <http://rpp.pe/lima/obras/video-municipalidad-de-lima-inauguro-el-tunel-benavides-en-surco-noticia-1034968> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Rubén Álvarez (2017). Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas de Open Course Ware. Recuperado https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema_10.pdf [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Segui, W. T. (2013) *Steel Design*. Quinta Edición.
- Silva, J. (30 de mayo de 2018). Blog 360° en Concreto: Construcción de la Línea 9 del Metro de Barcelona [Entrada en blog]. Recuperado de <http://blog.360gradosenconcreto.com/construccion-de-la-linea-9-del-metro-de-barcelona/> [Consulta: 22 de marzo de 2020].

- Stefano Bruni. Development of an integrated design methodology for a new generation of high performance rail wheelset. *World Congress on Railway Research 2001* Köln Germany.
- Swoboda, G. A.-K. (1999). Three-dimensional numerical modelling for TBM tunnelling in consolidated clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (14) 327-333. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(99\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(99)00047-4)
- Tatiya, R. (2015). Civil excavations and tunnelling. *Thomas Telford Limited*. <https://doi.org/10.1680/ceat.33405.fm>
- Tonon, F. (2010). Sequential excavation, NATM and ADECO: What they have in common and how they differ. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (25) 245-265. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.12.004>
- Zarzar, A. C. (octubre, 2015). Como vamos en movilidad. *Lima como vamos*, 4-5. Recuperado de <http://www.limacomovamos.org/movilidad-y-transporte/> [Consulta: 22 de marzo de 2020].
- Zhang, Z. X. (2018). Stability of NATM tunnel faces in soft surrounding rocks. *Computers and Geotechnics*, (96) 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.009>

ANEXO

Anexo 1: Vista de la sección transversal diseñada

En este anexo se encuentra la Figura 68, 69 y 70 donde se muestra el procedimiento de colocación con sus longitudes diseñadas del sostenimiento primario y secundario. Por último en la Figura 71 se muestra el sostenimiento y revestimiento actual utilizado en la Línea 2 del Metro de Lima.

Figura 68. Colocación de sostenimiento primario. Fuente propia, 2020.

Figura 69. Colocación de Celosía y Platina. Fuente propia, 2020.

Figura 70. Vista del recubrimiento y sostenimiento secundario. Fuente propia, 2020.

Figura 71. Muestra del Sostenimiento y Revestimiento utilizado en la Línea 2 del Metro de Lima. Fuente propia, 2020