

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



COMPARACIÓN DEL COSTO Y PLAZO EN LA CONSTRUCCIÓN DE ESTACIONES
SUBTERRÁNEAS TIPO CUT AND COVER Y CAVERNA EN LA PROVINCIA
CONSTITUCIONAL DEL CALLAO.

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL

AUTOR:

PEDRO MIGUEL CONTO JARAMILLO

ASESOR:

GUILLERMO JOSÉ ZAVALA ROSELL

Lima, Mayo de 2019

RESUMEN

Dos de los métodos más utilizados para la excavación de túneles viales y estaciones son: cut and cover (ejecución a cielo abierto) y el nuevo método austríaco (ejecución subterránea). Cada método y sus variantes tienen restricciones en su procedimiento que dependen del emplazamiento geológico. Estos aspectos impactan directamente en el costo y plazo de la ejecución de un túnel vial, más aún cuando la estratigrafía presenta perfiles de suelo blandos. El objetivo principal de esta tesis es comparar el costo directo y tiempos de ejecución para estaciones de metro subterráneas construidas con ambos métodos y emplazadas en la Provincia constitucional del Callao. Además, se identifican los puntos críticos del recorrido de la futura Línea 2 y ramal de la línea 4 del metro de Lima considerando los mapas de suelos y microzonificación sísmica. La metodología de la presente tesis plantea un análisis comparativo entre ambos métodos e incorpora modelos de estaciones ya ejecutadas en capitales como Santiago de Chile y Ciudad de México, las cuales comparten características demográficas y geológicas con Lima. Se identifican dos estaciones de interés: Av. Bocanegra y Av. Colonial las cuales están sobre un perfil Tipo III (S3 – Suelos Blandos) que incluye depósitos de suelos finos y arenas sueltas de gran espesor. Esta limitante obliga al uso de lodo bentónico para las partidas de excavación de muros Milán (cut and cover) elevando en 2 y 3 % el costo directo total. Las partidas más importantes son el movimiento de tierras y las losas waffle que juntas representan el 75% del costo total. Por otro lado, el recubrimiento doble en el caso del nuevo método austríaco, junto a las partidas de obras preliminares y movimiento de tierras en el túnel representan el 52.9% del costo directo. El análisis realizado indica que el nuevo método austríaco es 7.8% más costoso que el método Cut and Cover, al incluir los gastos generales esta diferencia se extiende hasta 12.5%. El incremento se debe al tiempo de ejecución que demanda el nuevo método austríaco que son 3 a 4 meses adicionales. A pesar de su larga duración este último tiene la ventaja de que no interrumpe las actividades en la superficie. Por otro lado, el método Cut and Cover es más eficaz en tiempos de ejecución, pero supone un costo extra (4% del costo total) para la reposición de la superficie la cual se intervino, la misma que interrumpe el flujo vehicular durante la excavación de los muros Milán. En el caso del nuevo método austríaco la incorporación de aditivos en el shotcrete permite mejorar el avance diario además de los costos. La evolución de ambos métodos de mano con la tecnología de materiales y maquinaria ha permitido a través del tiempo mejorar significativamente las velocidades de ejecución para la construcción de túneles viales urbanos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	GENERALIDADES.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	JUSTIFICACIÓN	3
1.3	ANTECEDENTES.....	3
1.3.1	Túnel Santa Rosa y San Martín	4
1.3.2	Estación Central Metropolitano	5
1.3.3	Riesgos en la ejecución del Nuevo Método Austríaco.....	7
1.4	ALCANCE.....	9
1.5	OBJETIVOS	9
1.5.1	Objetivo Principal	9
1.5.2	Objetivos Específicos	9
1.6	METODOLOGÍA	10
2	MARCO TEÓRICO.....	13
2.1	ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN TÚNEL.....	13
2.2	CARACTERÍSTICAS DE UN TÚNEL VIAL.....	13
2.3	DEFINICIÓN DE LOS SUELOS BLANDOS	14
2.4	DEFINICIÓN DEL POTENCIAL DE COLAPSO.....	15
2.5	SUBSIDENCIA Y CONVERGENCIA EN SUELOS BLANDOS	16
2.5.1	Control de desplazamientos	16
2.5.2	Anillos y Control de desplazamientos	17
2.6	NUEVO MÉTODO AUSTRÍACO (NMA).....	17
2.6.1	Inicio y evolución del método Austríaco	17
2.6.2	Definición del Nuevo Método Austríaco	18
2.6.3	Consideraciones para la ejecución en suelos blandos	23
2.7	VARIANTES DEL NUEVO MÉTODO AUSTRÍACO.....	24
2.7.1	Método de galerías laterales o “Side Drift”	24
2.7.2	Método de Tamez o Bóveda auto -portante (MBA)	26
2.8	MÉTODO DE CUT AND COVER	29
2.8.1	Definición del método Cut and Cover	29
2.8.2	Procedimiento constructivo del método Cut and Cover.....	29
2.8.3	Consideraciones para la ejecución en suelos blandos	33
3	GEOLOGÍA Y ENTORNO LOCAL DE LA PROVINCIA CALLAO	35
3.1	GEOLOGÍA	35
3.1.1	Litología de la roca de basamento.....	35
3.1.2	Material de cobertura	36
3.2	GEOMORFOLOGÍA.....	37
3.2.1	Geomorfología regional	37
3.2.2	Geomorfología local	37
3.3	RED DE ESTACIONES DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA EMPLAZADAS EN EL CALLAO.....	38
3.4	EMPLAZAMIENTO GEOLÓGICO DE LAS ESTACIONES	39
3.4.1	Mapa de tipo de suelos del Callao	40
3.4.2	Superposición del recorrido sobre el Mapa de suelos	40
3.5	EMPLAZAMIENTO SÍSMICO DE LAS ESTACIONES	43
3.5.1	¿Qué es un estudio de microzonificación sísmica?.....	43
3.5.2	Superposición del recorrido sobre el mapa sísmico del Callao.....	47
4	JUSTIFICACIÓN Y GEOMETRÍA BÁSICA DE LAS ESTACIONES	50
4.1	SELECCIÓN DE ESTACIONES TIPO Y SU EMPLAZAMIENTO	51
4.1.1	Estación del Ramal de la línea 4 proyectada con el Nuevo Método Austríaco.....	52
4.1.2	Estación de la línea 2 proyectada con el método Cut and Cover	53
4.2	JUSTIFICACIÓN PARA EL MODELO DE ESTACIÓN TIPO CAVERNA (NMA).....	54
4.2.1	Columna estratigráfica de la estación Inés Suarez.....	56
4.2.2	Descripción y geometría básica de la estación Inés Suarez.	57
4.3	JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE ESTACIÓN TIPO CUT AND COVER	67
4.3.1	Columna estratigráfica característica de la estación 20 de noviembre.....	68
4.3.2	Descripción y geometría básica de la estación 20 Noviembre.....	70

5	METRADO Y PROGRAMACIÓN DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS	74
5.1	ESTACIÓN AV. ÓSCAR R. BENAVIDES (MÉTODO CUT AND COVER)	74
5.1.1	Metrado y recursos necesarios	75
5.1.2	Cronograma de ejecución para el método Cut and Cover	81
5.1.3	Metodología para la programación de obra	82
5.2	ESTACIÓN AV. BOCANEGRA (NUEVO MÉTODO AUSTRÍACO)	85
5.2.1	Metrado y recursos necesarios	85
5.2.2	Cronograma de ejecución	89
6	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE EXCAVACIÓN	93
6.1	ANÁLISIS COMPARATIVO A TRAVÉS DEL DIAGRAMA DE PARETO	93
6.2	ANÁLISIS COMPARATIVO A TRAVÉS DE MATERIALES	97
6.3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TIEMPOS DE EJECUCIÓN	99
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
8	BIBLIOGRAFÍA	104
8.1	FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	104
8.2	THIRD MEETING TUNNEL & MINING LIMA-PERÚ	104
8.3	FUENTES DE INFORMACIÓN OFICIALES	104
8.4	REVISTAS DEL SECTOR CONSTRUCCIÓN, PERÚ	105
8.5	RECURSOS ELECTRÓNICOS	105
	Anexo A - CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTACIONES	106
	A 1 - ELEMENTOS BÁSICOS DE UNA ESTACIÓN TIPO CAVERNA	106
	A 2 - ESTACIONES TIPO CUT AND COVER	110
	A 3 - ESTUDIO DE LA DEMANDA DE USUARIOS EN LAS ESTACIONES	115
	A 4 - ZONIFICACIÓN Y ACTIVIDAD ECONÓMICA	116
	A 5 - CLASIFICACIÓN DE VÍAS DE ACUERDO A MTC	118
	Anexo B1 - MAPA DE SUELOS DE LA PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO	123
	Anexo B2 - MAPA SISMICO DE LA PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO	124
	Anexo B3 - RECORRIDO DE LA LINEA 2 DEL METRO DE LIMA Y RAMAL 4	125
	Anexo B4 - ESTIMACIÓN DE GASTOS GENERALES Y DE MAQUINARIAS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	– Red del metro de Lima. (Proinversión, 2012)	1
Fig. 2	– Infografía del derrumbe en el túnel Santa Rosa (La República, 2011)	4
Fig. 3	– Reinicio de obras en el túnel Santa Rosa (Emape, 2011)	5
Fig. 4	- Construcción de la estación central (Proinversión, 2011)	6
Fig. 5	- Titular Diario El País 2005	7
Fig. 6	– Elementos de un túnel (Fuente propia)	13
Fig. 7	- Registro gráfico de convergencia de puntos (Reig, 2010)	17
Fig. 8	- Registro de desplazamientos en un anillo (Reig, 2010)	17
Fig. 9	- Diseño tradicional y Diseño con Nuevo Método Austríaco (Santoyo, et all. 2013)	18
Fig. 10	- Curva de confinamiento (Reig 2010)	19
Fig. 11	- Micropilotaje en la sección de Corona (AATE, 2015)	20
Fig. 12	- Primera capa de hormigón proyectado (Azvi studios, 2010)	21
Fig. 13	- Cerchas metálicas para refuerzo (López, 2011)	21
Fig. 14	- Segunda capa de hormigón proyectado (Azvi studios, 2010)	21
Fig. 15	- Excavación de Destroza (Azvi studios 2010)	22
Fig. 16	- Instalación del carro de avance (Azvi studios, 2010)	23
Fig. 17	- micropilotaje en la sección de corona (Fuente propia)	23
Fig. 18	- Traslape de Micro pilotes (López, 2011)	24
Fig. 19	- Método de galerías laterales o “Side Drift” – Línea 6 Metro Santiago de Chile (Salzar B, 2011)	25
Fig. 20	- Método “Side Drift” alternativo (Salazar B, 2011)	25
Fig. 21	- Comparativa de diseño del método Tamez (Santoyo et all. 2013)	27
Fig. 22	- Procedimiento del método Tamez o Bóveda Auto-portante (Santyo et all. 2013)	27
Fig. 23	- Detalle de Zapata temporal (Velasco, 2014)	28
Fig. 24	- Armado de malla de acero (Velasco, 2014)	28
Fig. 25	- excavación del banco (Velasco, 2014)	29
Fig. 26	- Excavación de paredes laterales (Embalse contreras, 2011)	30

Fig. 27 - Instalación de armaduras de refuerzo y vaciado (Emblse contreras, 2011).....	30
Fig. 28 - Esquema de avance de Muros Milán (Fuente propia)	31
Fig. 29 - Entibado de los muros (Santoyo et all, 2011).....	31
Fig. 30 - Reposición de la superficie Cut and Cover (Proinversión, 2012).....	32
Fig. 31 - Plataforma inferior Cut and Cover (Proinversión 2012).....	33
Fig. 32 - Estabilización con lodo bentónico (Terratest, 2013).....	34
Fig. 33 - Ejecución a cielo abierto. Cut and cover (Satoyo et all, 2011).....	34
Fig. 34 - Depósitos aluviales, acantilado de la costanera Callao (Gobierno regional Callao, 2009).....	36
Fig. 35 - Vista aérea de la planicie aluvial ventanilla - Fuente: Google Earth 2012.	38
Fig. 36 - Trazo de la Línea 2 (Proinversión, 2012).....	38
Fig. 37 - Estaciones proyectadas en el Callao (Proinversión, 2012).....	39
Fig. 38 - Mapa de suelos de la Provincia Constitucional del Callao (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011)...	41
Fig. 39 - Mapa de suelos de la Provincia Constitucional del Callao (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011) ...	41
Fig. 40 - Mapa de sismicidad, oficina de acondicionamiento territorial Callao. (INDECI, CISMID, et al. 2011) 45	
Fig. 41 - Superposición del recorrido sobre el mapa de sismicidad del Callao. (INDECI, CISMID, et al. 2011) 48	
Fig. 42 - Red de estaciones intermedias de la Línea 6 del metro de Santiago de Chile (Velasco, 2013)	55
Fig. 43 - Cruce de las Avenidas Pedro de Valdivia.....	55
Fig. 44 - Vista en planta de la estación Inés Suarez (Velasco, 2013).....	58
Fig. 45 - Excavación de la galería de conexión-Fase 2 (Constructivo 2013, ed. 34)	60
Fig. 46 - Sección transversal de la galería de conexión-Fase 2 (Salzar B, 2011).....	61
Fig. 47 - Túnel inter-estación - Fase 3 (Velasco T, 2015).....	62
Fig. 48 - Arco reforzado del túnel inter-estación - Fase 3 (Velasco T, 2015).....	63
Fig. 49 - Tendido de rieles en túnel inter-estación - Fase 3 (Constructivo 2013, ed. 34).....	64
Fig. 50 - Estación Sao Cristavao – Metro Sao Paulo (Constructivo 2013, ed. 34).....	65
Fig. 51 - Geometría básica de una estación proyectada con NMA (Fuente propia).....	65
Fig. 52 - Emplazamiento de la estación 20 de Noviembre- línea 6 CDMX (Gutierrez, 2011)	68
Fig. 53 y 54 - Emplazamiento de la estación 20 de Noviembre- línea 6 CDMX (Gutierrez, 2011)	71
Fig. 55 - Procedimiento constructivo panel tipo Milán (Gutierrez, 2011)	81
Fig. 56 - Bóveda de inicio – Estación Inés Suarez, Línea 6 Santiago (Velasco, 2013).....	85
Fig. 57 - Enmallado previo a la segunda capa de hormigón (Velasco, 2013)	85
Fig. 58 - Diagrama de Pareto – Cut and Cover (Fuente propia).....	94
Fig. 59 - Diagrama de Pareto – Cut and Cover (Fuente propia).....	95
Fig. 60 - Partidas mayores – Cut and Cover (Fuente propia).....	96
Fig. 61 - Partidas mayores – NMA (Fuente propia).....	97
Fig. 62 – Resumen de los cronogramas de ejecución.....	97
Fig. 63 – Resumen de los costos totales de obras civiles	97

ÍNDICE DE FIGURAS - ANEXOS

Fig. A1 - Elementos de una estación tipo caverna (González, 2016).....	106
Fig. A2 - Modelos de estaciones subterráneas NATM (Velasco T, 2015).....	107
Fig. A3 - Vista isométrica de estación de paso o intermedia (Tunnel & Minning, 2015).....	107
Fig. A4 - Bóveda o Pique Circular - Santiago de Chile, Línea 6 (Velasco T, 2015).....	108
Fig. A5 Vista Isométrica de Galería de acceso (Velasco T, 2015).....	109
Fig. A6 - Vista Isométrica de Galería de acceso (Salzar B, 2011)	109
Fig. A7 - Sección de Entronque (Salzar B, 2011)	110
Fig. A8 - Elementos de una estación a desnivel (infovisual.es 2012)	111
Fig. A9 - Estación Hauptbahnhof, Munich (EFE, 2010).....	111
Fig. A10 - Estación Sáenz Peña, Santiago de Chile (EFE, 2010)	112
Fig. A11 - Estructura de una estación Cut and Cover (Proinversión, 2013)	113
Fig. A12 - Etapa 1 Muros Milán	114
Fig. A13 - Etapa 2 Plataforma Superior	114
Fig. A14 - Etapa 3 Plataforma Inferior	114
Fig. A15 - Encuentro del túnel TBM con la estación Cut and Cover (Proinversión, 2013).....	115
Fig. A16 – Estudio de demanda de usuarios en cada estación (Proinversión. 2013)	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Antecedente – Túnel Santa Rosa	4
Tabla 2 - Antecedente – Estación central	6
Tabla 3 - Antecedente – Colapso parcial en túnel	8
Tabla 4 - Clasificación de los Perfiles de Suelo (N. 030, 2016).....	14
Tabla 5 - Criterios para evaluar el potencial de colapso	16
Tabla 6 - Secciones de excavación – Método Austríaco	22
Tabla 7 - Resumen del método “Side Drift”	26
Tabla 8 - Detalle del recubrimiento del método Tamez	27
Tabla 9 - Estaciones en las zonas de interés.....	39
Tabla 10 - Emplazamiento geológico de las estaciones	42
Tabla 11 – Equivalencias del estudio de micro-zonificación sísmica con la norma E.030	46
Tabla 12 - Emplazamiento geológico de las estaciones	49
Tabla 13 - Características geológicas y urbanas de una estación del ramal Línea 4	51
Tabla 14 - Características geológicas y urbanas de una estación de la línea 2.....	51
Tabla 15 - Partidas de la Fase 1-Estación tipo caverna	58
Tabla 16 - Geometría básica de diseño Fase 1-Estación tipo caverna.....	58
Tabla 17 - Partidas de la Fase 2-Galería de conexión	61
Tabla 18 - Geometría básica de diseño Fase 2-Estación tipo caverna.....	61
Tabla 19 - Geometría básica de diseño Fase 2-Estación tipo caverna.....	63
Tabla 20 - Partidas de la Fase 3-Túnel inter-estación	64
Tabla 21 - Cuantificación de recursos para panel tipo Muro Milán	81
Tabla 22 - Resumen del avance por metro de túnel sostenido	100
Tabla 23 - Tiempos de ejecución de estructuras	100
Tabla 24 - Resumen del cronograma maestro	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A1 - Vista en planta y cortes de una estación tipo caverna (Velasco T, 2015)	108
Tabla A2 – Etapas de la construcción de una estación Cut and Cover.....	114
Tabla A3 – Estudio de demanda de usuarios en las estaciones de la Línea 2	116
Tabla A4 – Estudio de demanda de usuarios en las estaciones del Ramal Faucett-Gambeta	116
Tabla A5 – Zonificación de las estaciones de la Línea 2 (Proinversión, 2013)	117
Tabla A6 – Zonificación de las estaciones del ramal Faucett-Gambeta Línea 4 (Proinversión, 2013).....	117
Tabla A7 – Infraestructura de los tipos de estaciones.	118
Tabla A8 - Características de la red vial metropolitana de Lima y Callao.....	119
Tabla A9 – Clasificación del sistema vial metropolitano de Lima y Callao (O-341 ML, MTC, 2011).....	120
Tabla A10 – Análisis de la intersección vial en las estaciones de la Línea 2	121
Tabla A 11 – Análisis de la intersección vial en las estaciones en el ramal de la línea 4.....	121

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El índice demográfico y desarrollo urbano de la ciudad de Lima ha experimentado un crecimiento sin precedentes los últimos 15 años. Este fenómeno tiene impactos de orden social, comercial y en políticas de seguridad y de planificación urbana. Dentro de este último, se encuentra la demanda de un sistema de movilidad y transporte que pueda hacer frente a la actual demanda insatisfecha de los 9 millones de habitantes de Lima Metropolitana.

Por otro lado, la aprobación de distintos proyectos de infraestructura vial proyecta en nuestra capital un sistema de transporte integrado que tiene como eje principal a la red de Metro de Lima (fig. 2). Dicha red está integrada en su mayoría por sistemas de trenes subterráneos.



Fig. 1 – Red del metro de Lima. (Proinversión, 2012)

En mayo del año 2014, entró en operación la Línea 1 del metro de Lima con una extensión de 34 km que une los distritos de Villa el Salvador con San Juan de Lurigancho, el viaducto elevado está trazado sobre las principales avenidas de la capital. Estructuralmente se requirió la construcción de puentes sobre pilares de Concreto Armado.

En mayo de 2015, comenzó la fase de excavación en la etapa 1A de la línea 2 del metro de Lima, la cual comprende 5 Km de túnel, 6 pozos de ventilación y 5 estaciones. Esta primera etapa, inicia con la construcción de los pozos de ventilación y, luego, se continúa con el procedimiento constructivo del Nuevo Método Austríaco para la excavación del túnel.

La Autoridad Autónoma del sistema eléctrico de transporte Masivo de Lima y Callao (AATE) proyecta el inicio de la segunda etapa para mediados de 2018. En la actualidad, el avance del proyecto se

encuentra en 20%, debido a problemáticas contractuales como la legislatura de expropiaciones y la aprobación pendiente de Estudios definitivos de ingeniería (EDI).

En los capítulos posteriores, se desarrollará de manera detallada los métodos Cut and Cover y Nuevo Método Austríaco y su ejecución en la Provincia Constitucional del Callao prestando atención al emplazamiento geológico y sus limitantes. Se analizará, también, los cronogramas de ejecución y los costos globales proyectados para cada etapa de la ejecución.

Los proyectos viales de líneas de metro subterráneas- como la Línea 2- demandan la construcción de túneles con métodos tradicionales principalmente en 2 etapas. En primer lugar, una de ellas para el montaje de las tuneladoras tipo TBM (Tunnel Boring Machine) * y luego, otra para la construcción de las estaciones y sub estaciones que comprenden el recorrido de la Línea del Metro.

El termino TBM hace referencia a una maquinaria tuneladoras de avance automático que utiliza el material extraído y procesa los agregados útiles dependiendo el tipo de suelo, posteriormente se fabrican dovelas de concreto armado que conforman la infraestructura de sostenimiento del túnel.

La construcción de las estaciones y sub estaciones emplearán básicamente 2 tipos de intervención: una a cielo abierto y otra subterránea, ambas con limitaciones que más adelante se analizarán. Desde finales de los años noventa los métodos de excavación más utilizados en Sudamérica en proyectos viales de esta naturaleza son:

- El Método Austríaco: Intervención subterránea y de avance limitado se caracteriza por no afectar las actividades de la superficie durante su ejecución.
- Muros homigonados o Cut and cover: Intervención a cielo abierto con alta velocidad de levante, la cual consiste en la rapidez con la que se manejan los volúmenes de material extraído.

Las distintas características geológicas que presenta el suelo de Lima serán un factor determinante para la planificación de estos proyectos. Existirán, entonces, diferentes criterios para la elección de uno u otro método de excavación de túneles viales. Algunos factores importantes a tomar en cuenta son los siguientes: perfil de suelo a excavar, profundidad y ancho de túnel, impacto en zonas comerciales o residenciales, plazos de ejecución y el costo de estos (disponibilidad de equipos, mantenimiento, etc.)

La conocida “grava de lima” es un conglomerado de bolones redondeados y grava de diferentes texturas en una matriz de arena limo-arcillosa. Este tipo de suelo conforma el cono de deyección del río Rímac y Chillón. Sin embargo, este perfil estratigráfico no está presente en distritos que proyectan gran crecimiento demográfico como lo son Ventanilla, Puente Piedra, Villa El Salvador, San Juan de Miraflores, Chorrillos y la Provincia Constitucional del Callao, entre otros.

Estas jurisdicciones antes mencionadas presentan perfiles estratigráficos con presencia de arenas limosas (SM), arenas arcillosas (SC), limos y arcillas en ocasiones saturados. Esta variación de tipos de

suelo presentes en la Provincia Constitucional del Callao representa un aspecto importante a tomar en cuenta para la construcción de estaciones viales subterráneas con métodos de excavación convencionales.

El presente proyecto tiene como finalidad comparar el tiempo de ejecución y el costo de la construcción de una estación vial subterránea construida con el método Cut and Cover y otra construida con el Nuevo Método Austríaco. Por ello, es necesario estudiar las características del emplazamiento geológico y sus limitantes para la ejecución de los métodos constructivos.

Las estaciones de interés forman parte del ramal de la Línea 4 del metro de Lima (Av. Faucett – Av. Gambeta) y el tramo de la Línea 2 (Av. Colonial – Av. Guardia Chalaca), ambos ubicados en la Provincia Constitucional del Callao.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La importancia de este proyecto radica en dos enfoques. El primero de ellos plantea una metodología de comparación en base a costos directos de materiales, maquinaria, mano de obra y tiempos de ejecución para los dos métodos de excavación mencionados anteriormente.

El segundo enfoque tiene como objetivo la difusión de los métodos constructivos para túneles viales y estaciones subterráneas en emplazamientos regionales y el área urbana de Lima. La planificación y construcción de estas obras de infraestructura vial tienen un horizonte de ejecución en los siguientes 15 años, dada la demanda actual. Por esta razón, es determinante conocer el emplazamiento urbano y geológico donde se ejecutarán estas obras de excavación.

De manera especial, este proyecto toma atención a los perfiles estratigráficos en la Provincia Constitucional del Callao, ya que -a diferencia de otras zonas de la ciudad- este presenta suelos blandos y colapsables, así como los distritos de San Juan de Lurigancho, Ventanilla, Villa El Salvador y Chorrillos, que proyectan mayor crecimiento demográfico y, por ende, mayor demanda de un sistema de transporte masivo subterráneo.

1.3 ANTECEDENTES

La construcción de túneles viales y estaciones subterráneas en la zona urbana de Lima Metropolitana responde a factores de demanda por parte de la población y, de manera general, al crecimiento demográfico y planes integrales de ordenamiento territorial.

Los antecedentes constituyen una fuente de información importante cuando se trata de planificar un proyecto en geotecnia, debido a que el comportamiento del suelo y su respuesta ante sollicitaciones estructurales son siempre una variable. Los “casos reales” ó catástrofes conforman- junto con la Teoría y la investigación experimental- los “Pilares fundamentales”⁽¹⁾ en el desarrollo de la Geotecnia (Alonzo, 2005).

Debido a ello, se han documentado los principales sucesos, buenas prácticas y las eventualidades que se vienen dando durante la ejecución de los proyectos más importantes en infraestructura vial subterránea dentro del área urbana de Lima Metropolitana y el entorno geológico regional inmediato.

1.3.1 Túnel Santa Rosa y San Martín

Este proyecto está ubicado en el Cerro Santa Rosa, en el límite de los distritos de San Juan de Lurigancho y El Rímac. Las obras comprenden una intervención subterránea en roca y la construcción de dos túneles gemelos, ambos de 300 m de longitud.

Las operaciones se iniciaron en mayo de 2010 y el plazo de entrega era inicialmente de 18 meses. El avance se proyectó utilizando una variante del Método Austríaco aplicado a rocas. Desafortunadamente, el día 2 de febrero de 2011 ocurrió un derrumbe de 30 metros en la sección sur del túnel. Aproximadamente, 80m³ de roca bloqueó el acceso al frente de trabajo de los dos túneles. Por consiguiente, las obras se paralizaron y se contrató a una consultora para que evaluara los daños y reanudara, posteriormente, los trabajos. La figura 3 muestra el titular de un diario de circulación nacional y la correspondiente infografía del derrumbe ocurrido en febrero de 2011.



Fig. 2 – Infografía del derrumbe en el túnel Santa Rosa (La República, 2011)

En la tabla 1, se detalla el suceso ocurrido en febrero de 2011 y se indica las principales causas que llevaron al colapso del talud de roca y las acciones correctivas que se tomaron. Como se mencionó, las repercusiones que tuvo dicho evento afectaron directamente al plazo de la obra y, posteriormente, al presupuesto de esta. Además, generó daños en la infraestructura del ingreso al túnel.

Tabla 1 - Antecedente – Túnel Santa Rosa

SUCESO: DERRUMBE DE ROCAS EN EL FRENTE ESTE	
Posibles causas	<ul style="list-style-type: none"> - Fallas geológicas - Uso intensivo de explosivos para voladura
Intervención y acciones correctivas	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción de rampas de acceso para el acarreo de grandes volúmenes de rocas

	<ul style="list-style-type: none"> - Refuerzo exterior del frente de trabajo utilizando shotcrete con fibras metálicas.
Repercusión	<ul style="list-style-type: none"> - Paralización de la obra - Daños en el frente de ataque este - Incremento de presupuesto
Lección	<ul style="list-style-type: none"> - Reforzar los taludes de roca en los accesos a los frentes de trabajo - Considerar en el cronograma los tiempos de redistribución de energía de deformación en roca

Los años siguientes, mientras se evaluaba el presupuesto adicional cercano al 30% del monto inicial, se registraron, también, problemas externos como la expropiación de terrenos de vecinos de San Juan de Lurigancho y daños en la propiedad privada ocasionados por grietas en el suelo. Las obras no se retomaron hasta septiembre de 2014. El túnel entró en operación parcial en enero de 2016 luego de 4 años de retrasos y paralizaciones consecutivas. La figura 4 corresponde al reinicio de las operaciones en el frente este y se observa el refuerzo exterior con shotcrete en el talud de roca.



Fig. 3 – Reinicio de obras en el túnel Santa Rosa (Emape, 2011)

1.3.2 Estación Central Metropolitano

La estación central es parte del eje vial del sistema de transporte metropolitano de Lima y se ubica debajo del Paseo de los Héroes Navales, en la Av. Paseo de la Republica en el centro de Lima. El proyecto se inició en julio de 2007 y su ejecución duró 20 meses. Las obras comprendieron cerca de 15 metros de excavación, además de la construcción de 2 sótanos y accesos a desnivel, en un área total de 5800m².

La zona del centro de Lima representaba un emplazamiento difícil para la ejecución de una obra de este tipo, ya que el desvío del tránsito vehicular en esta avenida principal ocasionaría- además de molestias- un aumento en los tiempos de viaje. El método constructivo que se utilizó fue el “cut and cover” debido a la facilidad para reponer la superficie. La figura 5 muestra una vista elevada del frente de trabajo. En la parte inferior derecha podemos observar las vigas prefabricadas que luego se utilizaron sobre muros hormigonados para reponer la superficie.



Fig. 4 - Construcción de la estación central (Proinversion, 2011)

El aspecto determinante que hizo posible la elección del método Cut and Cover fue la extensa área a cubrir, además del tráfico vehicular. La estación central está proyectada para conectarse también con la línea 2 del metro de Lima. Por ello, demandó la construcción de 2 sótanos. Actualmente, está en funcionamiento y sirve de plataforma de embarque para miles de usuarios con rutas hacia el sur y norte de la ciudad.

La importancia de esta obra radica en la forma de ejecución de la misma y los métodos constructivos que se utilizaron. La ejecución de la estación central tuvo retrasos en su programación y -en ocasiones- enfrentó problemas administrativos y de licencia para la construcción. Dentro de los aspectos técnicos, se identificaron dos motivos por los cuales se retrasaban los procesos constructivos: acarreo del material extraído y desorganización en los accesos y vías alternas para los equipos y maquinarias.

Si bien tuvo retrasos en el plazo de entrega, es necesario mencionar que la estación central es uno de los primeros megaproyectos en materia de infraestructura vial subterránea y constituye una valiosa fuente de información, sobre todo, por las características de su emplazamiento.

La tabla 2 resume los acontecimientos y sus repercusiones durante la construcción de la estación central del Metropolitano. Se identificó las posibles causas del retraso de su construcción y las lecciones aprendidas, consecuentemente.

Tabla 2 - Antecedente – Estación central

SUCESO: INCUMPLIMIENTO DEL CRONOGRAMA	
Posibles causas	<ul style="list-style-type: none"> - Desorganización de accesos para equipos y maquinarias - Acarreo de material excavado ineficiente
Intervención y acciones correctivas	<ul style="list-style-type: none"> - Plan de desvíos y rutas alternas - Jornadas de doble turno - Uso de cintas transportadoras para el acarreo
Repercusión	<ul style="list-style-type: none"> - Paralización de la obra - Retraso en los plazos de entrega - Incremento de presupuesto
Lección	<ul style="list-style-type: none"> - Considerar acciones preventivas para el reordenamiento del tráfico vehicular durante la ejecución.

	- Utilizar tecnologías eficientes para el acarreo del material excavado.
--	--

La Estación Central se construyó sobre un emplazamiento de grava aluvial; no obstante, vale la pena analizar los métodos de sostenimiento que se utilizaron. Otro punto importante en esta obra es el plan de desvío vehicular que se aplicó. El modelo sirve para planificar la construcción de túneles en entornos de alto tránsito como son el cruce de la Av. Faucett con Av. Colonial y el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez. Los emplazamientos antes mencionados se encuentran en la Provincia Constitucional del Callao y las características geológicas de este entorno se explican más adelante.

1.3.3 Riesgos en la ejecución del Nuevo Método Austríaco

Un caso muy estudiado ocurrido el año 2005 es el de la construcción de la línea 5 del metro de Barcelona. Para esta función, se optó por el método Austríaco, pues la profundidad de 32 metros y líneas existentes hacía imposible una ejecución a cielo abierto con muros hormigonados.

Años atrás en Madrid, durante la construcción de la línea 4 del metro, se habían presentado problemas de asentamientos en la superficie de terrenos excavados con este método, probablemente, debido a que no se utilizó un espaciamiento adecuado en el refuerzo con los perfiles metálicos. El método fue observado por la municipalidad y se exigió no utilizarlo en suelos arenosos saturados (SC-SP), mientras se revisaba la normativa aplicada a la construcción de túneles.

Los constructores en Barcelona hicieron caso omiso a la evidencia descrita en el párrafo anterior. Como consecuencia se dieron 2 hundimientos durante la construcción del túnel en Barcelona. Esto ocasionó que muchas familias fueran desplazadas y que se inhabilitara un edificio que se inclinó; el titular en el diario El País de España señalaba:

“En Cataluña no se construirá ningún túnel más con el método utilizado en el Carmel, donde se han producido dos hundimientos que han acarreado el desalojo de más de 1.000 personas, el derribo de un bloque de viviendas y dos locales y exigirá el derribo de tres bloques más” (El País, España 2005).



Fig. 5 - Titular Diario El País 2005

Nuevamente, los problemas se presentaron debido a un mal refuerzo de las secciones de media luna excavadas con el método Austríaco. Además, podemos señalar que se trabajó a una profundidad de cerca de 32 metros y, sumado a ello, se tenía por encima cargas de tráfico provenientes de la línea 3 que circulaba en un nivel superior.

Una vez paralizada la obra, la solución que se dio fue utilizar 18.000 metros cúbicos de suelo para rellenar los 130 metros de túnel colapsado. El proceso duró entre dos y tres semanas y durante ese tiempo los vecinos seguían sin poder volver a sus domicilios. Luego de identificar las causas de este colapso parcial, el gobierno municipal de Cataluña ordenó la revisión y modificación de la normativa existente referente a excavaciones y túneles. En la tabla 3, se resume las causas, medidas correctivas adoptadas y las lecciones aprendidas para evitar posteriores colapsos.

Tabla 3 - Antecedente – Colapso parcial en túnel

SUCESO: COLAPSO PARCIAL EN TUNEL	
Posibles causas	<ul style="list-style-type: none"> - No se utilizaron suficientes refuerzos metálicos - Subestimación de cargas de tráfico vehicular y de tren
Intervención y acciones correctivas	<ul style="list-style-type: none"> - Relleno de las secciones colapsadas de túnel - Colocación de refuerzos metálicos en la sección de media luna - Reubicación de los habitantes del edificio colapsado
Repercusión	<ul style="list-style-type: none"> - Paralización de la obra - Inhabilitación de un edificio multifamiliar - Revisión de la normativa aplicada a la construcción de túneles
Lección	<ul style="list-style-type: none"> - Considerar los esfuerzos y cargas de tráfico vehicular y de trenes metro. - Aplicación obligatoria de cerchas o refuerzos metálicos en la sección de media luna - Programar tiempos óptimos para la redistribución de esfuerzos en la superficie excavada antes del sostenimiento primario.

Independientemente del tipo de suelo del emplazamiento, es necesario dejar “relajar” el estado de esfuerzos que se presentan en la superficie excavada del arco superior o corona del túnel. Luego, se procederá con el sostenimiento primario (hormigón proyectado con fibras metálicas) y, posteriormente, se aplicará el refuerzo con perfiles metálicos para el recubrimiento final.

“El objetivo es evitar la aparición de esfuerzos tangentes al arco. Además de los empujes perpendiculares esto puede ser crítico en caso de suelos incoherentes y con presencia de nivel freático” (Otero. 2011).

Posteriormente, nació la frase muy utilizada “metro excavado - metro sostenido” acuñada al método austríaco, y es esta la principal limitante geológica de este método. Cuando se trabaja en suelos poco resistentes o blandos (arenas saturadas o sueltas) es necesario cuantificar los esfuerzos a los cuales estará sometida la sección crítica de la “media luna” y diseñar un adecuado espaciamiento para la colocación de refuerzos de cerchas o perfiles metálicos.

En algunos casos será necesario transmitir los esfuerzos activos al interior del terreno a través de anclajes de profundidad media (4 a 6m) coronados en las mismas cerchas metálicas, también llamados bulones.

“Sir Alan Wood, del Imperial College, opinaba que la aplicabilidad del NATM en emplazamientos blandos como la London Clay debería restringirse solo a los cambios de sección y que en los túneles se ponga en práctica otros métodos más comprobados, aunque lentos en avance.”⁽³⁾

Heathrow Express Link, octubre 1994

⁽³⁾Prof. Manuel Melis Maynar; Construcción de Túneles en Suelos Blandos, E.T.S. de Ingenieros de caminos, Canales y Puertos – Universidad de La Coruña 1998 (pag.222)

1.4 ALCANCE

El presente proyecto comprende un planteamiento comparativo aplicado a los métodos de excavación para la construcción de estaciones subterráneas emplazadas en suelos blandos. Dicho planteamiento es válido para dos situaciones concretas:

- Excavación de túneles viales previos al montaje de tuneladoras tipo TBM (Tunnel Boring Machine).
- Construcción de estaciones subterráneas para un sistema de transporte metro.

Esta comparación se realizará partiendo del análisis de dos estaciones, una construida con el método Cut and Cover y otra que sigue los lineamientos del Nuevo Método Austríaco. Para ello, se tomará en cuenta los cronogramas de ejecución, rutas críticas, plazos de entrega, costos globales y maquinaria utilizada para la construcción de las estaciones.

El análisis comprende también las consideraciones y limitantes que plantea una ejecución sobre perfiles estratigráficos que presenten suelos blandos (arenas sueltas, limos y/o arenas con nivel freático).

Finalmente, los puntos de análisis que se toman para efectos de la comparación son las estaciones de la Línea 4, específicamente el recorrido del Ramal (Av. Faucett - Av. Gambeta) y el tramo de la Línea 2 (Av. Colonial – Av. Guardia Chalaca), ambos ubicados en la Provincia Constitucional del Callao.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo Principal

Comparar el costo diecto de las partidas principales y los tiempos de ejecución en la construcción de estaciones de metro subterráneas con los métodos Cut and Cover y Nuevo Método Austríaco emplazadas en la Provincia Constitucional del Callao.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Describir los métodos de excavación de túneles viales y estaciones subterráneas más recientes, sus características principales, limitaciones geológicas y las maquinarias necesarias para su ejecución.

- Identificar las condiciones y limitaciones a nivel geológico que implican una ejecución subterránea en la Provincia Constitucional del Callao.
- Trazar el recorrido de la Línea 4 del Metro de Lima, Ramal Av. Faucett - Av. Gambeta, sobre el mapa de suelos de la Provincia Constitucional del Callao para identificar los emplazamientos a nivel geológico de las futuras estaciones.
- Identificar las características generales de las estaciones de interés, de acuerdo con los parámetros del Ministerio de Transportes y Comunicaciones y estudios de demanda de usuarios en cada estación.
- Recopilar información de obras similares en otras ciudades como Ciudad de México, Quito y Santiago para conocer la geometría de las estaciones sobre emplazamientos geológicos de características similares al suelo de Lima y la Provincia Constitucional del Callao.
- Modelar una estación subterránea considerando la construcción con el método Cut and Cover.
- Modelar una estación subterránea considerando la construcción con el Nuevo Método Austríaco
- Efectuar un análisis comparativo para ambos métodos constructivos: tiempos de ejecución, recursos necesarios y costos directos de construcción.
- Analizar el impacto del emplazamiento geológico en el procedimiento constructivo de estaciones subterráneas aplicando los métodos convencionales.

1.6 METODOLOGÍA

La metodología para el análisis comparativo comprende, en primer lugar, la definición de ambos métodos de excavación, la forma de ejecución y las limitantes geológicas. Se presta atención a la aplicación de estos métodos de excavación en la construcción de túneles viales, específicamente en estaciones de línea metro emplazadas sobre suelos blandos.

Una vez que se hayan descrito los métodos, se procederá a identificar las características geológicas del emplazamiento de las estaciones en la Provincia Constitucional del Callao. De esta manera, se conocerá el entorno geológico y se podrá plantear un modelo de estación determinado.

Por otro lado, en los antecedentes se estudiarán los inconvenientes presentados durante la ejecución de obras viales similares, como son el subterráneo de Ciudad de México y la Línea Metro de Santiago de Chile. De esta manera, se prestará especial interés a aquellos emplazamientos sobre perfiles estratigráficos similares al entorno geológico regional de Lima.

El análisis de una obra subterránea en la Ciudad de México es un referente importante para el diseño de estaciones de Líneas Metro emplazadas sobre perfiles estratigráficos con presencia de limos, arcillas y arenas saturadas. Se sabe que la capital de México está emplazada, principalmente, sobre depósitos lacustres con estratigrafías de suelos finos.

Santiago de Chile representa un emplazamiento geológico similar a Lima. Gran parte de la capital peruana se encuentra construida sobre el cono de deyección del río Rímac y Chillón, mientras que en Santiago de Chile, sobre depósitos coluvio-aluviales del Río Maipo. En capítulos posteriores, se menciona con detalle la geología y el material de cobertura en estas ciudades.

Por otra parte, Lima, Santiago de Chile y Ciudad de México son metrópolis con alto peligro sísmico por estar situadas cerca al cinturón de fuego del Pacífico. De esta manera, las estructuras de las construcciones siguen códigos de diseño sismo-resistente muy estrictos. Para efecto del análisis y comparación que propone esta tesis, se tomará en cuenta la construcción de las siguientes estaciones:

- Estación Puente Alto, Línea 4 del Metro de Santiago de Chile, (Gomes, B. et al, 2005)
- Estación 20 noviembre, Línea 12 del Metro de Ciudad de México. (Gutiérrez Ortiz, Repositorio UNAM 2011)

Una vez definidos el marco teórico y la geología de estos casos, se superpondrá el mapa del recorrido de la línea 2 del metro de Lima, específicamente el Ramal Av. Faucett – Av. Gambeta, sobre el mapa de tipos de suelo en la Provincia Constitucional del Callao publicado el 2004 por el CISMID (Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres). Estos recorridos no tendrán futuras modificaciones, ya que fueron aprobados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) D.S. 049- 2012.

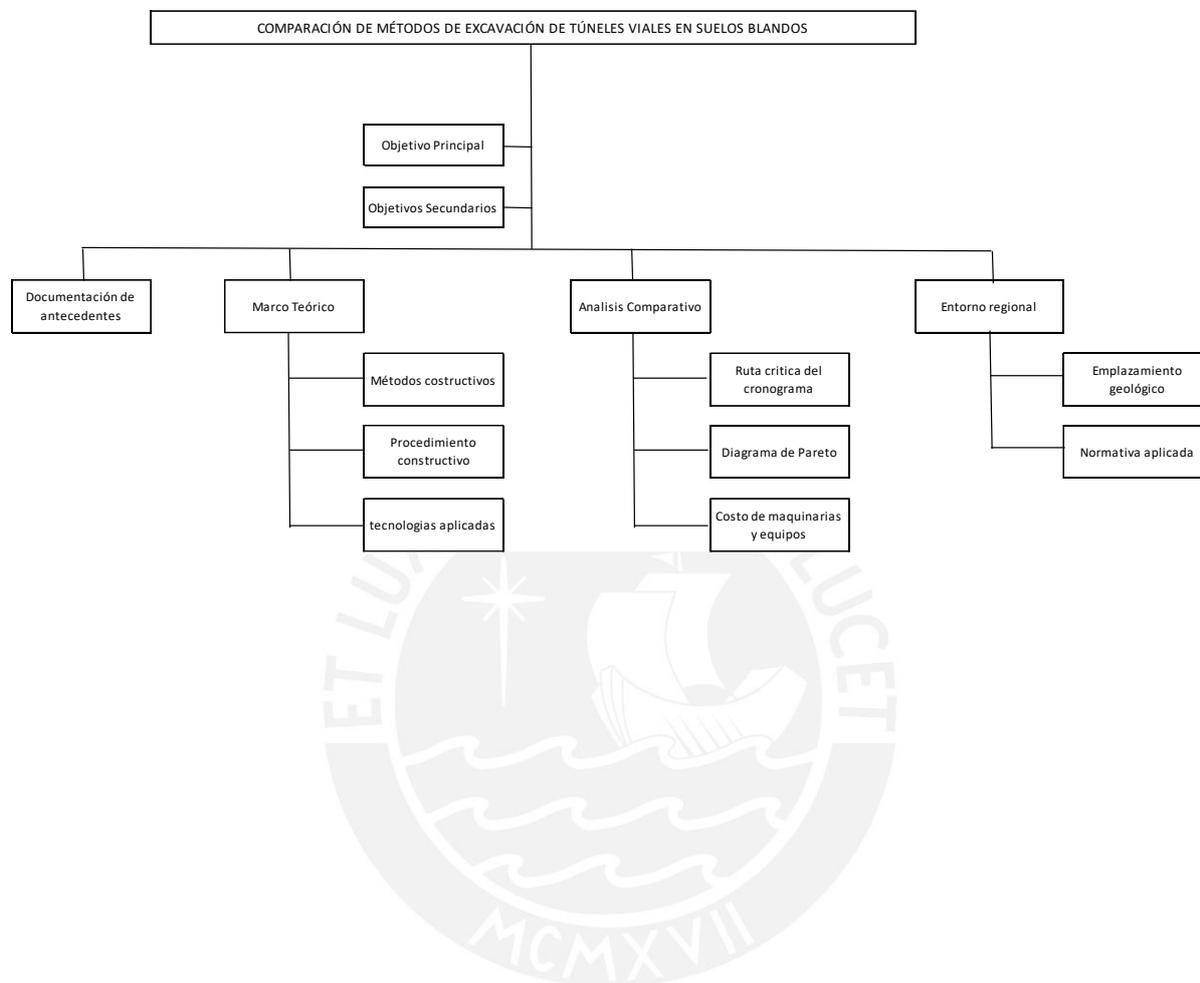
Para la selección de las estaciones, se empleará un ámbito comparativo considerando parámetros como la clasificación de vías de acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el estudio de demanda de usuarios publicado en las bases de concesión y la influencia de otras vías subterráneas si las hubiera. De esta manera, las dos estaciones que se elijan tendrán características similares de acuerdo con la demanda proyectada y la profundidad de cimentación.

Para las estaciones seleccionadas, se planteará un modelo de estación con ambos métodos. En cada una de ellas, se cuantificarán las partidas más importantes a fin de definir un presupuesto base para la construcción del casco de estas. El presupuesto base incluye el costo de los recursos humanos necesarios y de la maquinaria requerida para la ejecución.

Seguidamente, se planteará un calendario de ejecución para ambos métodos- tomando como base la construcción de estaciones en ciudades como Quito, Madrid y Ciudad de México- las cuales presentan un perfil estratigráfico con suelos blandos.

El análisis comparativo permitirá conocer el impacto del emplazamiento geológico en el procedimiento constructivo de las estaciones subterráneas proyectadas con los métodos Cut and Cover y Nuevo Método Austríaco. La identificación de las partidas más importantes en la ejecución de cada método se realizará a través del análisis de Pareto.

En el siguiente esquema, se resume los aspectos generales de la metodología que sigue esta tesis, en donde el análisis comparativo y los antecedentes del entorno regional son dos pilares importantes.



2.1 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN TÚNEL

Un túnel vial está conformado básicamente por tres elementos, cada uno con una función estructural determinada. La construcción de estos elementos marca las diferentes etapas en la ejecución de un túnel. La terminología que hace referencia a los elementos en un túnel es la siguiente:

- Anillo o corona
- Bataches o Hastiales
- Contra bóveda

El anillo está conformado por secciones de concretos encofrados en forma curva. Los bataches o hastiales, son secciones de concreto que transmiten las solicitaciones de carga del anillo hacía en suelo, los cuales son vaciados de manera alternada.

Finalmente, la contra bóveda es una especie de losa o solera que proporciona estabilidad a la superficie rodante del túnel. En la figura 7, se puede observar la distribución de los elementos estructurales que conforman un túnel.

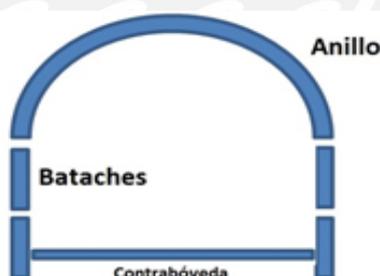


Fig. 6 – Elementos de un túnel (Fuente propia)

2.2 CARACTERÍSTICAS DE UN TÚNEL VIAL

Los túneles suelen clasificarse de acuerdo a 3 características importantes: su tiempo de vida útil, la profundidad y el emplazamiento. Para el caso de los túneles viales, cada una de estas características será explicada, ya que son tomadas en cuenta para su diseño y ejecución.

En primer lugar, vida útil para un túnel vial es de 70 a 100 años, debido a la importancia que tienen como infraestructura vial urbana. Estas estructuras constituyen conexiones de redes interdistritales e incluso inter Provinciales. Tal es el caso del túnel “Punta Olímpica”, el cual une las Provincias de Carhuaz y San Luis en el departamento de Áncash a 4730m.s.n.m.

En segundo lugar, la profundidad dependerá del tipo de vía que se proyecte, existen túneles para vías expresas con 2 o 3 carriles en cada sentido y también hay túneles para vías férreas que son utilizados por las redes de metro urbano e interProvincial.

Finalmente, la ejecución de un túnel vial depende del emplazamiento y sus características geológicas. De este modo, un túnel excavado en roca tiene otras consideraciones para su ejecución, diferentes a las que se tiene para un túnel excavado en suelo.

El presente proyecto tiene como objeto la comparación de métodos de excavación para la construcción de túneles viales que albergarán las vías férreas del metro de Lima 2. En el capítulo 3, se detalla ampliamente el emplazamiento geológico de la Provincia Constitucional del Callao y sus principales características.

2.3 DEFINICIÓN DE LOS SUELOS BLANDOS

Los suelos blandos son suelos que, debido a sus características mecánicas, tienen tendencia a deformarse demasiado bajo solicitaciones estructurales, lo cual ocasiona asentamientos no permisibles. En consecuencia, los suelos blandos poseen baja presión admisible; por eso, representan un gran riesgo para las cimentaciones y obras de sostenimiento durante la construcción de túneles viales.

La norma sismo resistente E.030 – 2016 dentro de la clasificación de los perfiles de suelo define el perfil S3 como “suelos blandos”. La tabla 4 muestra la clasificación de los perfiles de suelo de acuerdo a la Norma Peruana sismo resistente N.030 – 2016.

Tabla 4 - Clasificación de los Perfiles de Suelo (N. 030, 2016)

Perfil		Vs	N ₆₀	Su
S ₀	Roca dura	>1500 m/s	-	-
S ₁	Roca o Suelos Muy Rígidos	500 m/s a 1500 m/s	>50	>100 kPa
S ₂	Suelos Intermedios	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S ₃	Suelos Blandos	< 180 m/s	< 15	25 KPa a 50 KPa
S ₄	Condiciones excepcionales	Clasificación basada en el EMS		

Dentro de la clasificación y tipología de los suelos existen muchos perfiles que pueden clasificar como "suelos blandos", desde los suelos pantanosos con materia orgánica hasta los limos y arcillas de alta plasticidad en condiciones saturadas o los suelos que se encuentran sueltos además de perfiles estratigráficos compuestos por depósitos eólicos de arenas finas también llamados loes.

La norma técnica peruana propone 3 casos en los cuales un perfil estratigráfico se considera suelo blando.

- Arena gruesa a fina, o grava arenosa, con valores del STP $\tilde{N}_{60} \leq 15$
- Suelo cohesivo blando, con una resistencia al corte en condiciones no drenadas $25 \text{ kPa} (0.25 \text{ Kg/cm}^2) < S_u < 50 \text{ kPa} (0.5 \text{ kg/cm}^2)$.

- cualquier perfil que no corresponda al tipo S4 y que tenga más de 3m de suelo con las siguientes características: índice de plasticidad $P_I > 20$, contenido de humedad $w > 40\%$, resistencia no drenada $S_u < 25$ kPa.

El entorno local nos permite identificar algunos de estos suelos en el área urbana de la ciudad de Lima y, sobre todo, en distritos de la parte sur y norte de la ciudad como son Chorrillos, Villa el Salvador, Ventanilla, San Juan de Lurigancho y la Provincia Constitucional del Callao. A continuación, se describen las principales tipologías de suelos con alto potencial de deformación ante cargas estructurales o condiciones saturadas:

- SC, SM: son arenas limosas o arenas arcillosas que contiene material fino (malla nro. 200) mayor al 12%, en ocasiones con altos porcentajes de humedad $20 < w < 35$ y un valor de STP $\tilde{N}_{60} \leq 15$.
- Limos y arcillas de alta plasticidad: $I_p > 20$ y contenido de humedad $w > 40\%$.
- Loes: Son perfiles conformados por suelos arenosos, transportados por el viento, es decir, depósitos eólicos no saturados o secos. Los espesores de loes, en una planicie aluvial como la de ventanilla, pueden alcanzar de 10 a 15 metros de profundidad y poseen una compacidad suelta, de modo que su densidad natural es baja, alrededor de 1.70 gr/cm³ en contraposición a los 2.10 gr/cm³ característicos de las arenas húmedas medianamente compactas.

2.4 DEFINICIÓN DEL POTENCIAL DE COLAPSO

El potencial de colapso es un indicador que mide la susceptibilidad de un suelo a deformarse cuando a este se le solicitan cargas estructurales. Numéricamente, se expresa como un diferencial de deformación en porcentaje.

La norma técnica peruana E.050 de suelos y cimentaciones define en el acápite 29.2 la evaluación del potencial de colapso de la siguiente manera:

$$CP(\%) = \frac{\Delta Hc}{H_0} \quad \text{ó} \quad CP(\%) = \frac{\Delta e}{1+e_0} \times 100$$

En donde

Δe = Cambio en la relación de vacíos debido al colapso bajo humedecimiento.

e_0 = Relación de vacíos inicial

ΔHc = Cambio de altura de la muestra

H_0 = Altura inicial de la muestra (inalterada)

CP = Potencial de colapso expresado en porcentaje

* NTP E.050 Cap. 6 – art 29.2

El análisis se realiza a través del ensayo de colapsabilidad potencial según NTP 339.163 (ASTM D 5333). Las muestras requeridas para este ensayo son las de tipo Mib talladas a cielo abierto. En la tabla 5, se detalla los criterios de la norma técnica peruana para evaluar el potencial de colapso de un suelo.

Tabla 5 - Criterios para evaluar el potencial de colapso

CP (%)	Severidad del problema
0 a 1	No colapsa
1 a 5	Colapso moderado
5 a 10	Colapso
10 a 20	Colapso severo
>20	Colapso muy severo

La norma técnica peruana recomienda realizar pruebas de carga en estado seco y humedecido (ASTM 1194) para evaluar la susceptibilidad al colapso de un suelo sometido a cargas de servicio.

Con referencia a los suelos blandos (Perfil tipo S3), descritos en el acápite anterior, se puede conferir que los suelos cohesivos blandos con resistencia al corte en condiciones no drenadas ($25 \text{ kPa} < S_U < 50 \text{ kPa}$) presentarán un potencial de colapso mayor que el de las arenas gruesas o finas con valores del STP $\tilde{N}_{60} \leq 15$.

Salvo las excepciones de los estratos descritos como Loes (acápites 2.3) que son depósitos eólicos y presentan estratigrafías de arenas no consolidadas con alto contenido de vacíos, este perfil, específicamente, tiene gran susceptibilidad al colapso en condiciones de humedad o saturación.

2.5 SUBSIDENCIA Y CONVERGENCIA EN SUELOS BLANDOS

Existen dos tipos de desplazamientos inducidos por el estado de esfuerzos durante la construcción de un túnel. Ambos tipos de desplazamientos tienen etapas tempranas y tardías con características propias que dependen del tipo de suelo. A continuación, describimos los dos tipos de desplazamientos:

Subsidencia: Este fenómeno tiene dos etapas: una temprana, conocida como subsidencia por pérdida de volumen, y otra tardía, que tiene que ver con la consolidación de terrenos compresibles como son el caso de arcillas o limos (suelos cohesivos).

Convergencia: Este fenómeno se origina por los desplazamientos relativos entre dos puntos de una sección del túnel.

2.5.1 Control de desplazamientos

Cuando acaba la etapa de presostenimiento (Primera capa de hormigón proyectado) en el túnel excavado en suelo, se colocan sensores para permitir la lectura referencial entre dos o más puntos en un mismo anillo. De esta manera, se establecen varios puntos de control en un mismo anillo del túnel. Estos puntos se triangulan y sus desplazamientos se monitorean permanentemente con técnicas topográficas.

La figura 8 muestra un típico gráfico de desplazamientos relativos entre dos puntos de un mismo anillo en el túnel. El registro de estas convergencias se lleva por 2 a 3 semanas hasta alcanzar un estado de deformaciones controladas.

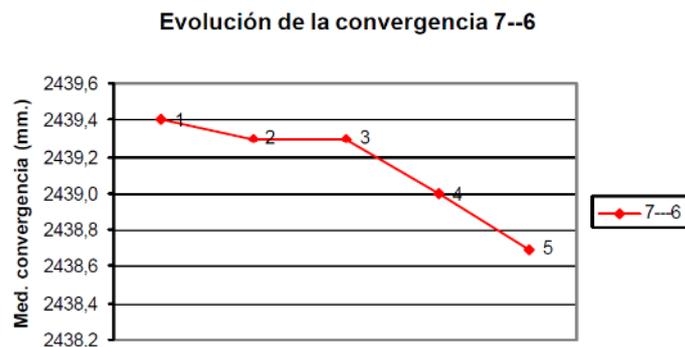


Fig. 7 - Registro gráfico de convergencia de puntos (Reig, 2010)

2.5.2 Anillos y Control de desplazamientos

Se llama anillo de referencia a una distribución de puntos de control definidos en un mismo eje transversal al túnel. La triangulación y convergencia entre varios puntos permite obtener un registro de desplazamientos en una sección completa, como se muestra a continuación.

Los documentos técnicos y normativos contemplan la instalación de estos anillos de referencia cada cierto kilometraje del túnel, las distancias de control suelen ser cada 15 a 25 metros, dependiendo de la estabilidad del suelo. El registro gráfico de los desplazamientos se muestra en un corte transversal de la sección del túnel, tal como detalla la figura 9.

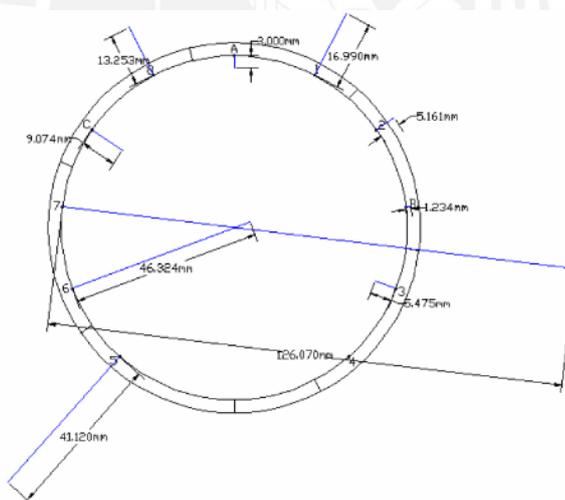


Fig. 8 - Registro de desplazamientos en un anillo (Reig, 2010)

2.6 NUEVO MÉTODO AUSTRÍACO (NMA)

2.6.1 Inicio y evolución del método Austríaco

El diseño tradicional de túneles en 1900 consideraba que la sección de la bóveda debería estar calculada para soportar todo el peso del suelo o roca por encima del túnel. Esta afirmación fue sustituida gracias al Prof. Karl Terzaghi, quien propuso un concepto visionario que llamó “Carga de roca” (Terzaghi, 1940). Quedó demostrado que la magnitud de la carga actuante sobre los túneles disminuye gracias a un efecto de “arqueado de los suelos o rocas” que ocurre de manera natural.

Dentro del túnel la “Carga de roca” es una sección transversal por unidad de longitud circundante al arco de bóveda o ademe. La sección se extiende formando una curva compuesta con una altura de aproximadamente 0.7 el ancho del túnel. Esta interpretación propuesta por el Prof. Karl Terzaghi permitió un diseño de túneles más racional.

En 1962, el Dr. Ladislaus von Rabcewicz, profesor de la Vienna University of Technology demostró que el diseño y construcción de un túnel se podía optimizar aceptando una deformación del conjunto corona y suelo o roca. Esta premisa de la aceptación de un estado deformado del suelo asumía la existencia de asentamientos tolerables en la superficie inmediata, los cuales no debían exceder los asentamientos límites de las estructuras o fundaciones que pudieran existir en la superficie.

De esta manera, el conjunto que conforman la corona (entiéndase la parte superior de la sección) con el suelo es considerado un elemento estructural compuesto que estabiliza el entorno superior inmediato a la sección de la corona. A continuación, en la figura 10, observamos un esquema comparativo entre secciones de túnel, uno considera el diseño tradicional y el otro, el Nuevo Método Austríaco.

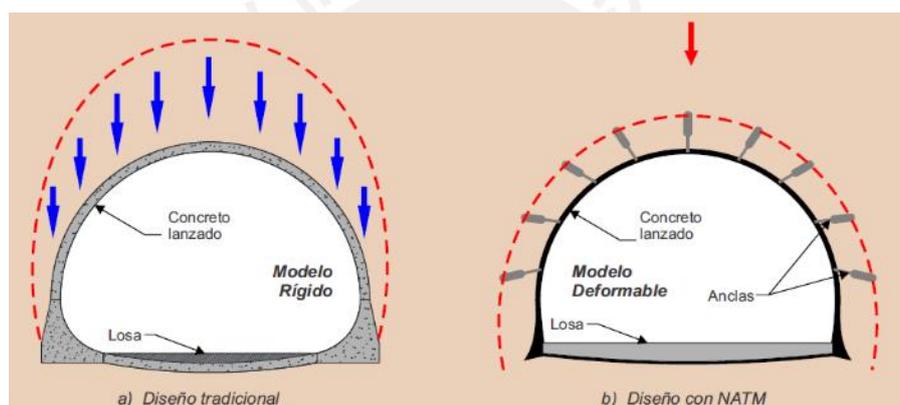


Fig. 9 - Diseño tradicional y Diseño con Nuevo Método Austríaco (Santoyo, et al. 2013)

Del lado izquierdo de la imagen se observa la llamada sección de “Carga de roca” por encima del arco o ademe del túnel, mientras que el lado derecho muestra el conjunto estructural que conforman la corona y el suelo circundante.

2.6.2 Definición del Nuevo Método Austríaco

El nuevo método Austríaco o NATM (New Austrian Tunneling Method) es una técnica semi-empírica desarrollada a partir de los estudios del Prof. Rabcewicz en 1962 y mejorada en décadas posteriores gracias a los conceptos de Convergencia-confinamiento (Fenner y Pacher, 1973).

La aplicación de este método para la construcción de túneles tiene dos principios:

Primero, aceptar que el proceso de excavación induce al suelo a un estado de deformación en el cual se reducen las cargas que debe soportar el arco del túnel reforzado.

Segundo, el terreno coopera parcialmente en su sostenimiento, conjuntamente con una capa de hormigón proyectado o shotcrete en la sección del arco superior o corona. La manera de lograr un arco integrado

es con el uso de pernos de anclaje o bulones. En cierta manera, se puede afirmar que la sección del arco del túnel está “colgando” de los anclajes.

El profesor Dr. Ladislaus von Rabcewicz (1962), dedujo la deformación que debe tolerar el punto central del arco de un túnel para que se reduzcan los esfuerzos a un valor mínimo, mediante la expresión:

$$z = \frac{1 - \mu^2}{E} R (3\sigma_x - \sigma_z)$$

Donde:

z = Relación de Poisson

E = Módulo de elasticidad

R = Radio del túnel

σ_x y σ_z = Esfuerzos horizontal y vertical

La solución propuesta por el Prof. Rabcewicz fue aplicada con éxito en la construcción de túneles, ya que las bombas y toberas de los equipos de Shotcrete habían evolucionado para la época además de los aditivos químicos en el concreto para acelerar el endurecimiento y lograr casi de inmediato la resistencia necesaria. La incorporación de las fibras metálicas en el año 1985 significó un gran impulso para esta técnica.

Fenner y Pacher (1973), siguiendo los principios de isotropía de los suelos, desarrollaron los criterios de Convergencia-confinamiento que hacen referencia a los esfuerzos que se generan producto del estado de deformación de una sección de túnel excavado. Sus trabajos culminaron con la elaboración de la Curva Característica del túnel o curva de confinamiento en la cual se representan los desplazamientos del arco versus los estados de deformación de la sección del túnel.

La isotropía es una propiedad física de suelos por la cual una partícula presenta siempre el mismo comportamiento independientemente de la dirección en la cual se le apliquen solicitaciones estructurales. A continuación, en la figura 11, se presenta la curva característica del túnel o curva de confinamiento y un esquema de la sección transversal del túnel en el cual están representados los desplazamientos y los esfuerzos que actúan en la sección.

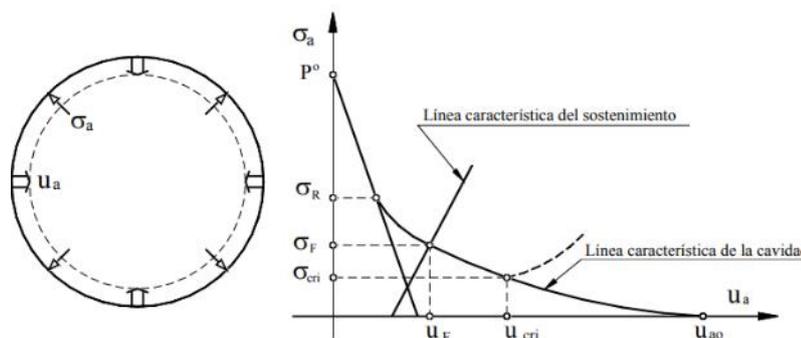


Fig. 10 - Curva de confinamiento (Reig 2010)

La curva característica del túnel se intersecta con la curva de sostenimiento en el punto donde la presión de confinamiento del túnel es igual a la presión de sostenimiento del mismo, (σ_F, u_F) . El punto hace referencia Indirectamente a la deformación trascurrida antes de colocar el mencionado sostenimiento.

A) Micropilotaje en la sección de corona

El micropilotaje en la sección superior de la corona del túnel tiene como objetivo el pre sostenimiento del túnel. Dependiendo del tipo de suelo, el espaciamiento entre micro pilotes será distinto, para suelos blandos y rocas erosionadas entre 0.80 y 1.5 metros y para perfiles granulares consolidados entre 1.0 a 2 metros. El diámetro de estos está entre los 8 a 10 cm y su longitud puede alcanzar los 3 a 5 metros. En la figura 12, se observa los trabajos de micropilotaje en la parte superior conocida como corona.



Fig. 11 - Micropilotaje en la sección de Corona (AATE, 2015)

B) Sostenimiento primario

Una vez que se tiene la sección de media luna excavada, se procede al recubrimiento primario en el cual se utilizan mallas electro soldadas y una primera capa de hormigón proyectado o shotcrete con un espesor de 8 a 12cm. Esta etapa de sostenimiento primario tiene como objetivo liberar el frente para seguir avanzando con la siguiente sección de media luna. La figura 13 muestra la primera capa de hormigón proyectado sobre la sección de media luna.

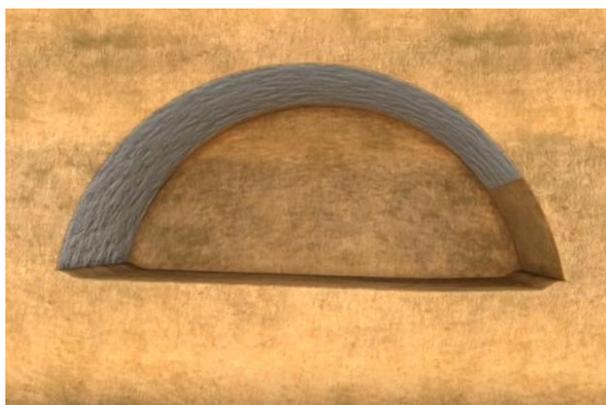


Fig. 12 - Primera capa de hormigón proyectado (Azvi studios, 2010)

C) Refuerzo de la sección.

El refuerzo de la sección de media luna o corona comprende las siguientes estructuras:

- Cerchas metálicas (Perfiles H o T)
- Mallas electro soldadas

Los perfiles o cerchas metálicas se colocan con un espaciamiento de 50 a 100cm y las mallas electro soldadas se fijan a estos perfiles. La finalidad de estos refuerzos es otorgar una flexibilidad al conjunto estructural del túnel. A continuación, la figura 14 muestra el armado de las cerchas metálicas conjuntamente con un enmallado.



Fig. 13 - Cerchas metálicas para refuerzo (López, 2011)

D) Segunda capa de hormigón proyectado.

Una vez colocados los refuerzos metálicos se añade a la superficie una capa de hormigón proyectado que puede variar entre 8 y 12cm de espesor, aplicado en fases y con aditivo de fibras metálicas. El hormigón proyectado debe cumplir además ciertos requisitos como un TM menor a 1/2" y un slump mayor a 20" (diámetro). La figura 15 muestra la segunda capa de hormigón proyectado sobre los refuerzos metálicos de la sección.



Fig. 14 - Segunda capa de hormigón proyectado (Azvi studios, 2010)

Dependiendo de los parámetros resistentes del suelo, esta segunda capa puede llevar o no fibras metálicas. En el caso de la capa definitiva (última) de recubrimiento, el espesor puede llegar hasta los 15cm y utilizar un enmallado adicional.

E) Excavación de la destroza

La parte inferior a la sección de media luna se llama destroza. Su excavación se da siguiendo un patrón establecido, en el cual se procede a través de plataformas y niveles distintos. Esto tiene por finalidad dar paso a maquinarias que se encuentren trabajando en la sección de media luna siguiente. El Nuevo Método Austríaco comprende un avance como el ilustrado en la figura 16.

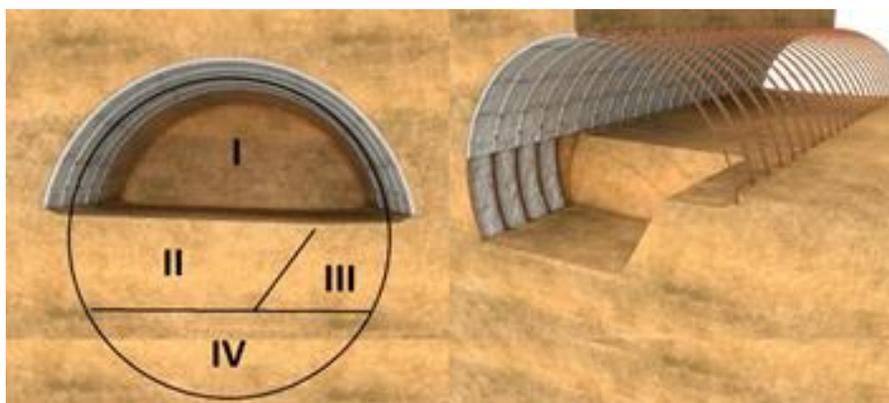


Fig. 15 - Excavación de Destroza (Azvi studios 2010)

A continuación, en la tabla 6, se describe la funcionalidad de cada una de las secciones que forman parte de la destroza:

Tabla 6 - Secciones de excavación – Método Austríaco

Sección	Funcionalidad
I	Permite el avance de la excavación de sección “media luna”
II	Plataforma con un ancho tal que permite el paso de equipos mecánicos para el acarreo de material excavado.
III	Talud escalonado con plataforma menor entre 1 y 2m que permite el paso de equipos mecánicos de excavación.
IV	Sección de contrabóveda sobre la cual se montará el material rodante y/o fajas transportadoras.

F) Encofrado y revestimiento final

Luego de la excavación de las secciones II, III y IV se instalan unos rieles para el montaje de una maquinaria conocida como “carro de avance”, el cual está conformado por paneles autoajustables a la forma del túnel y que tiene una profundidad de entre 3 y 5 metros. La maquinaria se alinea con el eje del túnel y deja un espaciamiento de 15 a 20 cm, sobre el cual se inyectará posteriormente el hormigón con aditivos de fibras metálicas, lo cual conformará la superficie definitiva. El procedimiento se ilustra a continuación en la figura 17.



Fig. 16 - Instalación del carro de avance (Azvi studios, 2010)

2.6.3 Consideraciones para la ejecución en suelos blandos

Este método se caracteriza principalmente por cooperar con el suelo para equilibrar los empujes y esfuerzos de deformación que puedan producirse, sobre todo, durante la excavación de la sección de “media luna” en la etapa inicial de excavación de destroza.

Uso de Micropilotes en perfiles de suelo blando

La ejecución del Nuevo Método Austríaco, tanto en suelos blandos como en macizos rocosos con RMR bajo, requiere un presostenimiento de la sección de corona o elipse superior.

Dicho pre sostenimiento se realiza a través de micro pilotes vaciados *In situ* en la sección de la corona del túnel. Esto se hace con la finalidad de garantizar la estabilidad del suelo mientras se procede con la excavación mecánica en las diferentes secciones del túnel proyectado. Las dimensiones de los micro pilotes suelen ser de 10 a 15 cm de diámetro y una longitud de hasta 5 metros. En la figura 18 se puede observar en la parte superior de los micro-pilotes vaciados *in situ* espaciados cada 80cm en todo el perímetro superior del túnel, sección conocida como la corona.

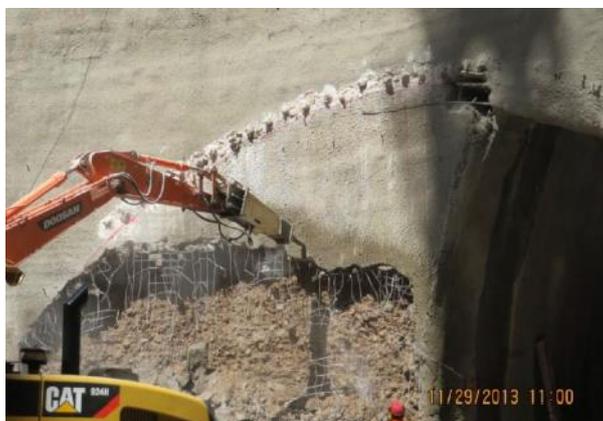


Fig. 17 - micropilotaje en la sección de corona (Fuente propia)

A medida que la extracción del suelo en la sección superior avanza, es necesario seguir colocando micro pilotes traslapando los de la sección anterior. De esta manera, hay una sección efectiva de micro pilote

que sostiene al suelo durante la excavación y otra de traslape. Esta segunda suele tener una extensión de 50cm a 1m y tiene como objetivo transmitir esfuerzos hacia la siguiente sección de avance. La figura 19 ilustra la manera de traslape en los micro pilotes en la sección superior del túnel conocida como corona.

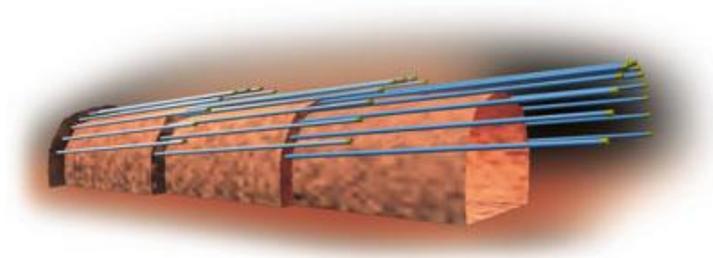


Fig. 18 - Traslape de Micro pilotes (López, 2011)

2.7 VARIANTES DEL NUEVO MÉTODO AUSTRÍACO

La ejecución estricta del Nuevo Método Austríaco supone asentamientos en la superficie o fenómenos de subsidencia inevitables. Los rangos permisibles dependerán en gran manera del tipo de estructura que se encuentre en la superficie inmediata. Existen variantes al procedimiento de excavación en el túnel que controla mejor los límites de subsidencia, en especial cuando la ejecución supone un emplazamiento sobre suelos blandos o finos.

Estos métodos alternativos son utilizados también en la construcción de bóvedas con grandes dimensiones como las proyectadas en las estaciones subterráneas o en las plataformas de abordaje de pasajeros.

En esencia, estos métodos variantes proponen, básicamente, una nueva secuencia de excavación utilizando tabiques provisionales que ayudan al control de subsidencia en la superficie. En lo que respecta al recubrimiento, se siguen los principios de recubrimiento primario y secundario; sin embargo, el avance por secciones genera varias discontinuidades en el recubrimiento.

2.7.1 Método de galerías laterales o “Side Drift”

El método de las galerías laterales o “Side Drift” es un procedimiento semi-empírico desarrollado durante el proyecto de ampliación de la línea metro de Madrid en 1994. Su aplicación está enfocada en la construcción de galerías y plataformas de abordaje en estaciones subterráneas de línea metro.

El principio fundamental del método es la construcción de tabiques temporales que controlan los esfuerzos responsables de la subsidencia. Si se hace una comparación entre este procedimiento y el Nuevo Método Austríaco podemos observar que el método de galerías laterales o “Side Drift” transmite los esfuerzos de deformación a través de 4 tabiques (dos galerías laterales), mientras que en la sección de la corona del Nuevo Método Austríaco, esta transmisión de esfuerzos es a través de bulones y dos tabiques de concreto proyectado.

La figura 20 muestra la secuencia de excavación propuestas por el método “Side Drift”. Las últimas secciones del túnel en ser excavadas son las secciones 5 y 6, las cuales sirven de contrafuerte para contrarrestar los esfuerzos perpendiculares al frente de excavación. La única desventaja del método “Side Drift” son los tiempos de ejecución, pues el trabajo con galerías laterales supone un avance lento y con discontinuidades en el revestimiento.

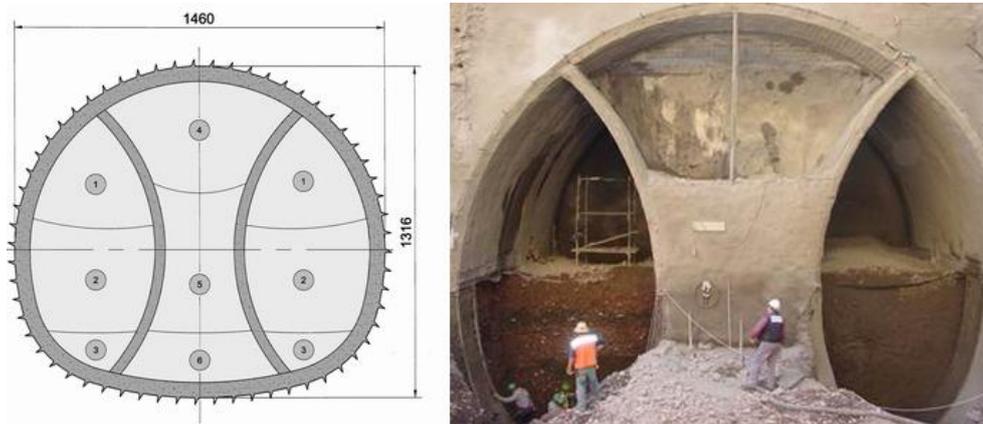


Fig. 19 - Método de galerías laterales o “Side Drift” – Línea 6 Metro Santiago de Chile (Salzar B, 2011)

Dependiendo de las dimensiones proyectadas en la galería central o plataformas de abordaje, el método de galerías laterales o “Side Drift” propone secuencias de excavación alternativas para reducir el tiempo de avance sin descuidar el control de los asentamientos por subsidencia.

El método de las galerías laterales o “Side Drift” recibe muchas críticas por el elevado costo que implica construir tabiques provisionales, es decir, elementos que luego no formarán parte de la estructura final, y por su avance lento. Sin embargo, su desempeño en el control de la subsidencia es óptimo, en especial cuando las estructuras en la superficie demandan asentamientos admisibles menores a 20mm.

La figura 21 muestra el procedimiento alternativo del método Side Drift para la excavación de suelo aplicado durante la construcción de las estaciones de la línea 6 del metro de Santiago de Chile. Es necesario mencionar que la estratigrafía de la capital chilena es similar al suelo de Lima. Ambas metrópolis están emplazadas sobre depósitos aluviales con gravas arenosas consolidadas en su mayoría (GC-GP, GM-GP).

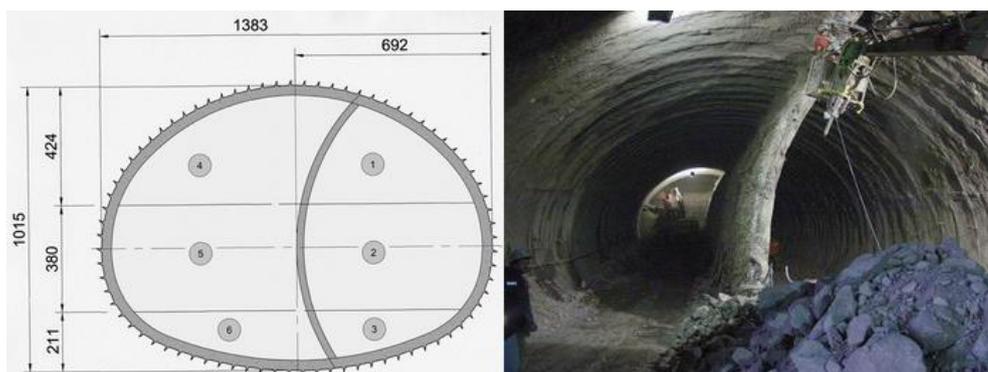


Fig. 20 - Método “Side Drift” alternativo (Salazar B, 2011)

A manera de resumen se presenta la tabla 7 la cual detalla las ventajas y desventajas del método de galerías laterales o “Side Drift”, así como una estimación del recubrimiento para una sección tipo.

Tabla 7 - Resumen del método “Side Drift”

Ventajas	Desventajas
Mejor control de los asentamientos superficiales (subsistencia)	Avance lento a razón de 3 metros sostenidos por día (Línea 6, Metro de Santiago), debido a la utilización de equipos livianos y tabiques provisionales.
Efecto de contrafuerte en las secciones centrales e inferiores del túnel.	Sobrecosto en las partidas de hormigón proyectado.
Recubrimiento Primario	Recubrimiento Secundario
<ul style="list-style-type: none"> - 5cm de Shotcrete para estabilizar el suelo - Perfiles de acero espaciados cada 1 a 1.5 metros - 40cm de shotcrete con fibras metálicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Malla de varillas de acero - 20 cm de Concreto Lanzado

2.7.2 Método de Tamez o Bóveda auto -portante (MBA)

El método de Tamez o de la bóveda auto-portante comprende la ejecución de una estructura independiente que no necesita cooperar con el suelo para su sostenimiento. El método tiene su inicio en 1992, durante la excavación de una estación del metro de la ciudad de México.

El diseño y construcción de esta estación estaba planificado según los lineamientos del Nuevo Método Austríaco. Durante las excavaciones, el túnel se mantenía estable y los constructores advirtieron que podían seguir adelante sin colocar anclas o bulones en la sección superior. Sin embargo, las autoridades convocaron a consultores expertos para tomar las medidas correctivas necesarias.

El Dr. Harald Wagner (Technical University Graz in Austria), especialista de seguridad en el NATM, recomendó la instalación inmediata de anclas o bulones e incrementar su cantidad. En contraparte, el Prof. Enrique Tamez, docente de la Universidad Autónoma de México, explicó que el concreto lanzado se había acumulado en la base, lo cual formó una especie de “zapata burda” que ayudó a estabilizar el túnel sin la necesidad de anclajes. Finalmente, la conclusión del profesor fue “diseñar zapatas longitudinales con concreto lanzado y acero reforzado” (Tamez, 2012)

Esta solución planteada por el Prof. Tamez permitía minimizar la cantidad de anclajes o bulones en la sección superior del túnel u omitirlas con la condición de que la estructura de la corona descansa sobre zapatas temporales y una viga durmiente de “amarre”. De esta manera, se dota de rigidez a la sección superior de la bóveda.

En la figura 22, se muestra la comparación entre el Nuevo Método Austríaco y el método de Tamez o de bóveda auto-portante. Se puede observar el detalle de las “Zapatas longitudinales” en la base de la sección del túnel, después se llamó “Pata de elefante” a este tipo de zapata.

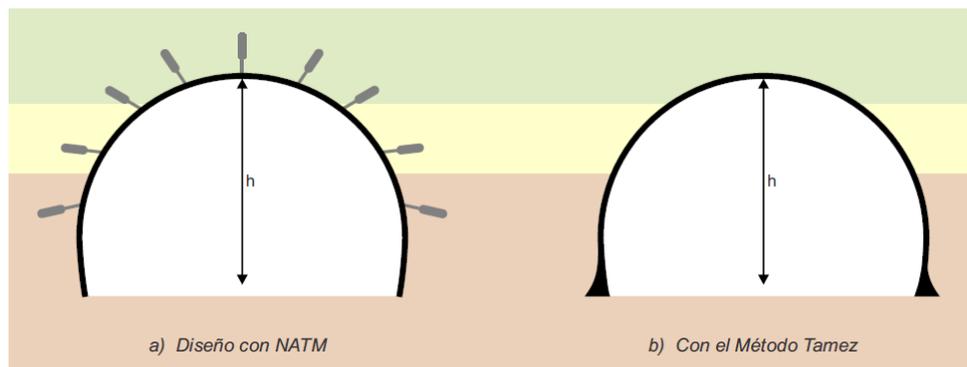


Fig. 21 - Comparativa de diseño del método Tamez (Santoyo et all. 2013)

La ventaja principal de este método es la rapidez en el avance (4 a 5 metros por día). Esto se debe a que el procedimiento ya no considera los anclajes o bulones en la sección superior del túnel. El sostenimiento de la sección superior recae sobre las patas de elefante o vigas durmientes ubicadas a ambos lados de la base. Posteriormente, se excava la sección central de la bóveda y la contra-bóveda. Para el sostenimiento definitivo, se construyen zapatas definitivas que, a manera de calzaduras, reciben los esfuerzos del arco inicial a través de las zapatas temporales.

En resumen, el método Tamez o de la Bóveda Auto-portante se trata de un método alternativo que puede prescindir de los anclajes o bulones. Esto se logra a través de la ejecución de zapatas temporales, también llamadas “patas de elefante” que reciben los esfuerzos transmitidos por el arco superior.

El procedimiento constructivo de este método se divide en dos etapas:

- A) Sección superior y zapatas temporales
- B) Sección inferior y zapatas definitivas

A continuación, en la figura 23, se muestra el procedimiento del método Tamez. Se observa que el espesor de las zapatas definitivas es mayor al de las zapatas temporales o intermedias, también llamadas “patas de elefante”.

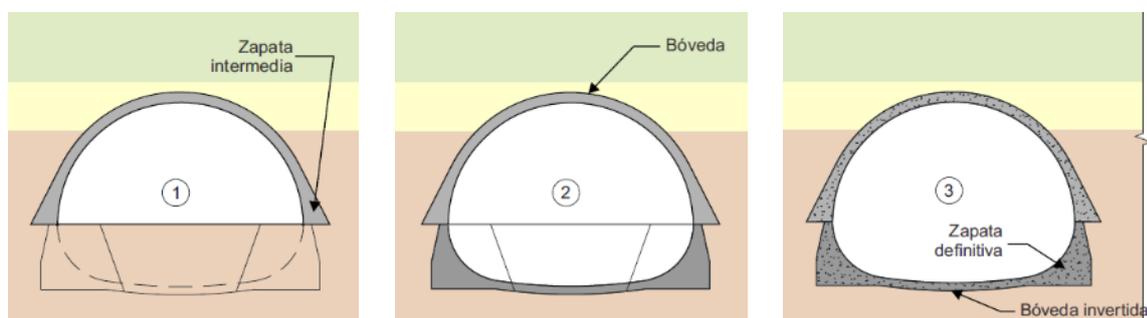
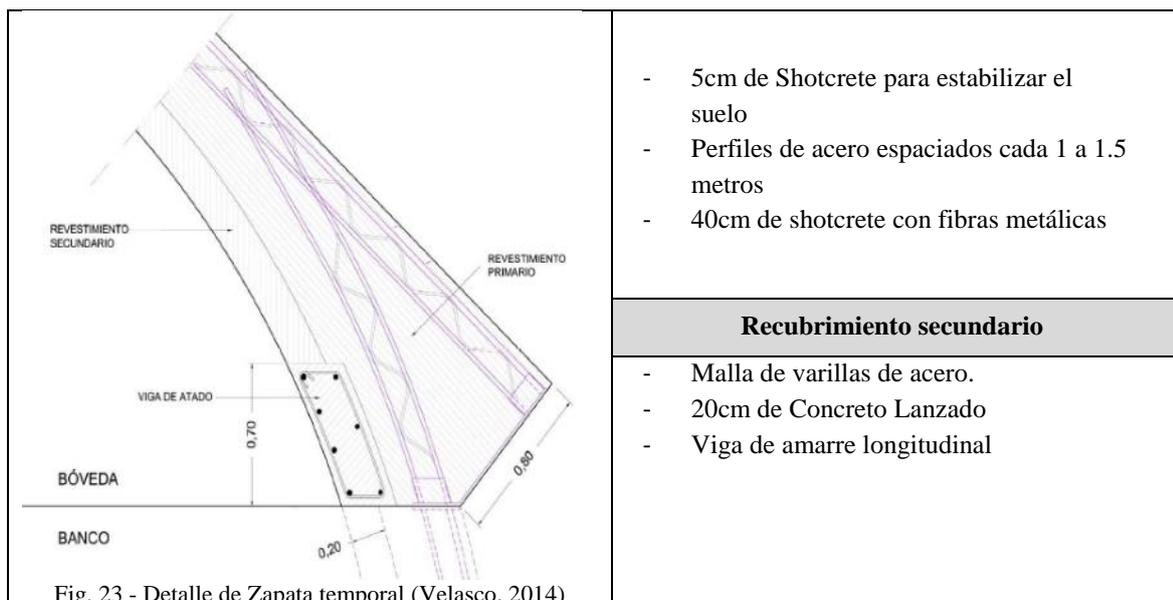


Fig. 22 - Procedimiento del método Tamez o Bóveda Auto-portante (Santyo et all. 2013)

La tabla 8 muestra el diseño de la zapata temporal (Figura 24) y el detalle de los recubrimientos con concreto lanzado. Las dimensiones de la viga durmiente o viga de amarre son de 20 x 70 cm.

Tabla 8 - Detalle del recubrimiento del método Tamez

Detalle de la zapata temporal	Recubrimiento primario
-------------------------------	------------------------



El recubrimiento secundario o Final en el método de Galerías laterales o “Side Drift” y el método de Tamez o de la Bóveda auto-portante se realiza lanzando concreto con fibras metálicas sobre una malla de acero. En ello se diferencia del Nuevo Método Austríaco, que utiliza el encofrado en carro de avance.

Las dimensiones de una galería de conexión o una plataforma de abordaje están entre 10 y 17 metros, por lo que no resulta óptimo el armado de un encofrado longitudinal para el recubrimiento definitivo. En las secciones del túnel inter-estación que son más largas (18 a 25 metros) el armado del encofrado en carro de avance sí es una alternativa a evaluar. Sin embargo, a partir del año 2005 la mejora en los aditivos para concreto lanzado y la tecnología de las bombas y equipos mecánicos utilizados desplazó el uso de encofrados en rieles.

La figura 25 muestra una sección superior de un túnel previo al recubrimiento secundario o definitivo con la malla de acero fijada en la bóveda. Se observa un equipo ligero de color rojo realizando zanjas para el armado de la viga de amarre o viga durmiente, el concreto lanzado llenará también la zanja para conformar un solo bloque estructural.



Fig. 24 - Armado de malla de acero (Velasco, 2014)

El procedimiento continúa con la excavación de la sección inferior del túnel conocido como banco. Es en esta etapa en donde se coloca la zapata definitiva, la cual es como una calzadura de la zapata temporal.

En la figura 26 se muestra el acarreo de material del banco. Asimismo, se puede observar la línea de discontinuidad que divide a la zapata temporal de la zapata definitiva a aproximadamente una altura de 3.5 metros del nivel excavado.



Fig. 25 - excavación del banco (Velasco, 2014)

2.8 MÉTODO DE CUT AND COVER

El método Cut and Cover por su naturaleza se clasifica como una ejecución a cielo abierto, ya que es necesario ocupar temporalmente la superficie bajo la cual estará la estación o túnel, siempre que no existan condicionantes mayores como obras subterráneas intermedias, instalaciones importantes u otro tipo de impedimento.

2.8.1 Definición del método Cut and Cover

El método Cut and Cover consiste en la construcción de muros hormigonados o muros Milán^(f), también llamados, Top Down o método inverso. Recibe esta denominación, ya que primero se construyen las paredes laterales del túnel y la losa superior que se apoya en los muros y después se extrae el material atrapado con maquinarias.

Es importante mencionar que este método suele tener un alto rendimiento cuando se trata de estaciones o túneles no tan profundos, es decir, de no más de 15 metros de profundidad, ya que el procedimiento es repetitivo; cavar, sostener y avanza. Según la estructura proyectada, se pueden diferenciar tipos de estaciones subterráneas o túneles construidos con esta tecnología:

- Estación o falso túnel entre muros con losa plana de hormigón armado.
- Estación o falso túnel entre muros con bóveda ejecutada “*in situ*” sobre terreno excavado.

^(f) Los muros Milan, son estructuras de concreto armado vaciadas in-situ. Estos muros coforman las paredes laterales de los túneles viales y tienen profundidades de 20m aproximadamente.

El término “anillo de nivel”, aplicado a calzaduras o muros pantalla, no tiene aplicación en el método Cut and Cover, debido a que los muros hormigonados son vaciados en su altura total y luego se procede con el proceso del entibado de estos mismos.

2.8.2 Procedimiento constructivo del método Cut and Cover.

A) Excavación de los muros Milán^(f)

La excavación de los muros comprende anchos que pueden variar entre 30cm y 80cm, las profundidades llegan hasta los 15m. Este procedimiento se realiza con una pala mecánica que acciona una cuchara en su extremo, conocida como almeja hidráulica. La tecnología se aplicó con éxito en 2016 durante la ejecución del túnel vial Av. 28 de Julio con Av. Arequipa, (Cercado de Lima).

Se programa un avance intercalado dejando muros intermedios con el fin de no comprometer la estabilidad natural del terreno. A continuación, en la figura 27, se observa la excavación con el equipo conocido como almeja hidráulica.

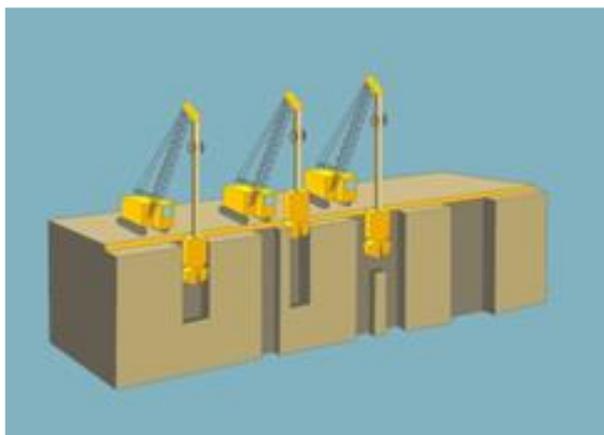


Fig. 26 - Excavación de paredes laterales (Embalse contreras, 2011)

B) Instalación de la armadura de refuerzo y vaciado de concreto

Una vez excavadas las paredes laterales se procede con ayuda de una grúa a colocar las armaduras de refuerzo, las cuales son previamente armadas en superficie. Es necesario controlar la verticalidad en posición de estas armaduras, así como el espaciamiento que se deja entre el acero y la pared del terreno. Este proceso puede verse en la figura 28 a continuación.

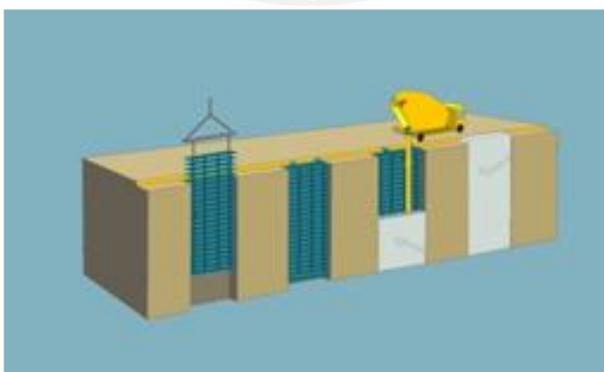


Fig. 27 - Instalación de armaduras de refuerzo y vaciado (Emblse contreras, 2011)

Por otro lado, existe una mayor concentración de refuerzo en la zona central del muro hormigonado, ya que en este lugar se tensarán los cables de acero que transmiten los esfuerzos de empuje activo hacia el interior del terreno.

El proceso de vaciado se da en forma continua en cada muro, vibrando constantemente para llenar todos los espacios vacíos. Dependiendo de la longitud de estos muros y del ancho del volumen de concreto a vaciar, puede variar entre 3 y 5m³ por muro.

Es recomendable planificar un avance en “damero” para realizar la excavación y vaciado de los muros hormigonados. De esta manera, se otorga al terreno cierto nivel de holgura para que pueda redistribuir sus esfuerzos. En la figura 29, se detalla el esquema de avance de los Muros Milán, intercalando entre los dos frentes laterales.

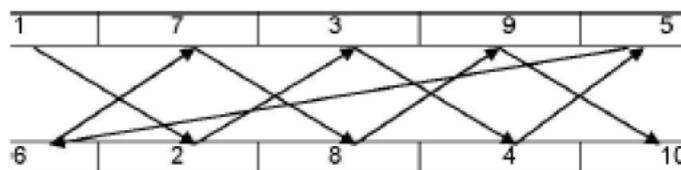


Fig. 28 - Esquema de avance de Muros Milán (Fuente propia)

C) Movimiento del material

Una vez vaciado el concreto, se suele esperar entre 5 y 10 días para poder remover el material de un lado del muro. Durante este procedimiento no se deja libre toda la cara lateral del este. Es necesario conservar temporalmente una pequeña altura de terreno con el fin de lograr un esfuerzo pasivo que impida el volteo del muro de concreto armado.

D) Entibado del Muro Milán

Una parte muy importante en la ejecución del método Cut and cover es el entibado del muro. Podemos decir que el empuje activo del terreno reacciona con el opuesto a través de un sistema de entibado con perfiles de acero, los cuales son reemplazados por vigas postensadas. Este mecanismo trabaja compresión y se coloca en la parte superior y media del muro hormigonado. En la figura 30, se muestra el entibado de los Muros Milán en dos niveles.



Fig. 29 - Entibado de los muros (Santoyo et all, 2011)

E) Reposición de la superficie

Después del entibado, se utilizan vigas prefabricadas con secciones 30x60cm ó 45x70cm para poder reestablecer la superficie del túnel. Este procedimiento tiene lugar cuando las deformaciones del conjunto terreno-muro están controladas, es decir, cuando cumplen con los requisitos de verticalidad.

Sobre esta estructura, nuevamente, se asfalta la calzada vehicular y se puede transitar normalmente, mientras que al interior del túnel pueden seguir los trabajos de movimiento de tierras. La figura 31 muestra el colocado de Vigas prefabricadas sobre las cabezas de los Muros Milán.



Fig. 30 - Reposición de la superficie Cut and Cover (Proinversión, 2012)

F) Excavación de la plataforma de abordó

Una vez que se repone la superficie continúan los trabajos al interior del túnel para excavar la segunda plataforma, por la cual los pasajeros abordarán los vagones del tren. El acarreo del material excavado en esta sección es transportado hacia la plataforma superior y luego a la superficie por accesos dejados durante la ejecución.

Es importante mencionar las longitudes que cubren las dos plataformas, la plataforma superior o primer sótano alcanza desde 10 a 20 metros. Mientras que la plataforma inferior donde los pasajeros abordan los trenes alcanza de 40 a 60 metros de longitud. En capítulos posteriores se detalla la geometría y demás características de una estación proyectada con el método Cut and Cover.

A continuación, la figura 33 muestra la segunda plataforma o sótano 2 con el material ya excavado, se observa también las columnas centrales que ayudan al sostenimiento del primer sótano.



Fig. 31 - Plataforma inferior Cut and Cover (Proinversión 2012)

2.8.3 Consideraciones para la ejecución en suelos blandos

El método Cut and cover es actualmente muy utilizado casi en todo tipo de terrenos, ya sea para la construcción de perfiles de gran altura, intercambios viales, pozos de relaves mineros etc. Es posible incluso trabajar en terrenos con presencia de nivel freático, con ayuda de bombas de succión que permiten vaciar el concreto premezclado con aditivos que aceleran la fragua.

El método tiene ciertas limitaciones en la etapa de excavación en suelos blandos en los cuales al momento de introducir la armadura y antes del vaciado, las paredes laterales excavadas pueden derrumbarse. Se suele mitigar este efecto utilizando lodos de bentonita al momento de introducir la cuchara mecánica.

Estabilización con Lodo bentónico

Cuando se ejecuta el método Cut and Cover o muros Milán en un estrato con perfil de suelo blando. Es necesario estabilizar la superficie a medida que esta se excava. Un material muy utilizado para este procedimiento es la bentonita. El procedimiento supone la instalación de una bomba que llena de lodo bentónico la zanja en la cual se está excavando y a su vez va extrayendo el material sobrante.

La partida de estabilización de superficie suele ser de gran importancia en los presupuestos de ejecución, ya que la intervención sobre un perfil de suelo blando requiere de este material, a diferencia de la intervención sobre un terreno estable como las gravas. En la figura 34 se ilustra una zanja llena de lodo bentónico y la excavación con cuchara tipo almeja.



Fig. 32 - Estabilización con lodo bentónico (Terratest, 2013)

Control de verticalidad en la excavación

Cuando la cuchara tipo almeja está excavando y encuentra un estrato de suelo blando esta tiende a desviarse pues se le hace más fácil la extracción de material blando.

Existen equipos modernos que permiten monitorear el avance y verticalidad de la cuchara los cuales también llevan un control de la velocidad de excavación. Otra alternativa es utilizar técnicas alternativas que garanticen la verticalidad de la cuchara en todo momento, como instalar micro pilotes guía a ambos lados del Muro Milán a excavar.

A continuación, la figura 35 muestra la etapa final de una excavación con el método Cut and Cover, tal como se observa los trabajos en la superficie se reanudan conforme el acarreo de material continúa dentro del túnel. Se puede observar las vigas prefabricadas o metálicas que sostienen el pavimento de la superficie y a su vez accionan con el empuje activo de un muro a otro.



Fig. 33 - Ejecución a cielo abierto. Cut and cover (Satoyo et al., 2011)

3 GEOLOGÍA Y ENTORNO LOCAL DE LA PROVINCIA CALLAO

3.1 GEOLOGÍA

3.1.1 Litología de la roca de basamento

El área de estudio se emplaza sobre afloramientos del batolito de la costa peruana perteneciente al Cretáceo-Terciario inferior. Este se caracteriza por ser un complejo de diferentes rocas intrusivas cuya composición varía desde granito, diorita a gabro y se encuentra emplazado paralelo a la zona de subducción. (Cobbing, 1973). A continuación, se describe el grupo o la formación sobre la cual se halla el área de estudio:

- Grupo Rímac, Formación Colqui: presencia de piroclásticos y derrames andesíticos con minerales de lavas de estructura almohadillada y admigdaloides con intercalación esporádica de areniscas volcánicas.
- Grupo Puente Piedra, Formación Ventanilla: sobre la Formación Puente Inga, lutitas, andesitas, limolitas y algunas capas de chert, aflora en el cerro Chillón.
- Formación Herradura: compuesta por lutitas arcillosas, areniscas y caliza silícea blanca.

En el anexo A1, se encuentra el mapa geológico correspondiente al cuadrante 18S, la información cartográfica fue elaborada por el INNGEMMET y es propiedad de la oficina de acondicionamiento territorial de la Provincia Constitucional del Callao. Este mapa muestra información geológica de cada distrito, representado por el material de base- compuesto en muchos casos por depósitos fluviales y Coluviales- así como también los afloramientos rocosos presentes en determinadas zonas de la planicie aluvial de ventanilla.

Del anexo A1- Mapa geológico de la Provincia Constitucional del Callao, podemos concluir que hacia la parte sur se presenta un vasto depósito aluvial que cubre los distritos de La Perla, Bellavista, Carmen de la Legua, etc. El depósito aluvial está compuesto por un conglomerado inconsolidado de matriz limo-arenosa con frecuentes ocurrencias de capas lenticulares de arcillas húmedas.

Hacia el norte, se encuentran depósitos coluvio-aluviales y pequeñas quebradas producto de la acción erosiva del río Chillón. Estos depósitos cubren el área de los distritos de Ventanilla y Comas. En gran parte de estos distritos resalta la presencia de limonitas y arcillas blandas al tacto, las cuales se intercalan con areniscas de limosas de color gris beige.

En la zona norte del litoral, se encuentran los Humedales de Ventanilla. El emplazamiento geológico está compuesto por depósitos marinos con bolonería y gravas gruesas inconsolidados envueltas en matriz mayormente arenosa y cementada por horizontes salinos (comúnmente denominado caliche).

3.1.2 Material de cobertura

Se le denomina de esta forma a los materiales inconsolidados acarreados y acumulados por las aguas marinas, superficiales y por el hombre. Se disponen y correlacionan con depósitos que se extienden en los otros distritos de la Provincia Constitucional del Callao, dichos materiales pueden ser tratados como depósitos aluviales, coluvio-aluviales, eólicos y marinos.

A continuación, se describen 3 tipos de depósitos presentes en la zona de interés (zona urbanizada de la Provincia Constitucional del Callao). En capítulos posteriores, se analizará la distribución de estos materiales de cobertura sobre los puntos específicos de análisis.

Depósitos aluviales: formado por el arrastre y la acumulación del río Rímac y Chillón cuyo material ocupa la mayor extensión en esta parte de la Provincia Constitucional del Callao. De esta forma, se forma la planicie aluvial, llanura de inundación, etc. Consisten en arcilla con limo y arena intercaladas con gravas gruesas con una disposición ordenada. A continuación la figura 36 muestra la formación.



Fig. 34 - Depósitos aluviales, acantilado de la costanera Callao
(Gobierno regional Callao, 2009)

Depósitos coluviales: Son acumulaciones constituidas por materiales de diverso tamaño, pero de litología homogénea- englobados en una matriz arenosa que se distribuye irregularmente en la base de las vertientes, formado, además, por alteración y desintegración de las rocas ubicadas en las laderas de los cerros adyacentes. Se caracterizan por contener gravas y bloques angulosos- sub angulosos distribuidos en forma caótica, sin selección ni estratificación aparente, de consolidación entre regular a pobre. Ocasionalmente contienen algunos horizontes lenticulares de limo arenoso.

Depósitos eólicos: Son acumulaciones de arenas depositadas por el viento en las planicies que conforman la penillanura costera. En el área en estudio, se presentan a modo de mantos de arena de unos pocos metros de espesor o como pequeñas dunas aisladas. Las arenas son de grano medio a grueso y de color gris oscuro por su contenido de mineral ferro magnesiano o arenas finas cuarzosas de color más claro y de mayor movilidad.

Podemos describir las terrazas aluviales que ocupan la parte media/baja de la cuenca del río Rímac como una estructura anticlinal, fallada por estructuras orientadas de N-S con espesores de 400 a 600m de depósito aluvial conocido como “cono de deyección”, compuesto por granos de arenas medias y gruesas con mayor incidencia los granos gruesos GP-GM, de características rodadas; también llamados conglomerados de Lima.

Los materiales de cobertura predominantes son los depósitos aluviales, compuestos por un conglomerado inconsolidado de matriz limo-arenosa con frecuentes ocurrencias de capas lenticulares de arcillas húmedas y algunos indicios de terreno agrícola en épocas pasadas.

3.2 GEOMORFOLOGÍA

3.2.1 Geomorfología regional

El área en estudio se ha emplazado en las pampas costaneras, que representa una de las principales unidades geomorfológicas que se distribuyen en el territorio peruano. Esta unidad se extiende en la región geográfica denominada costa, se caracteriza por cubrir una amplia planicie delimitada por los ríos Chillón, Rímac y Cañete. Hacia el Este está representado por el flanco occidental de la cordillera de los Andes y al oeste tiene como límite el océano pacífico. Está constituido por materiales transportados y acumulados por las aguas superficiales.

3.2.2 Geomorfología local

Las unidades geomorfológicas más representativas para la Provincia del Callao son las planicies costeras y conos deyección. Esta zona se ubica entre el borde del litoral y las estribaciones de la Cordillera Occidental constituida por la faja angosta del territorio paralelo a la línea de costa. Es en los valles Chillón y Rímac donde adquiere mayor amplitud.

Una de estas planicies lo constituyen los conos aluviales de los ríos Chillón y Rímac, cuya depresión fue rellenada con materiales aluviales de diferente granulometría (gravas y arenas, limo y arcillas provenientes del transporte y sedimentación); las fracciones gruesas presentan una forma redondeada. La planicie del río Rímac se extiende por el sur hasta los distritos de Magdalena y Barranco; y por el norte, limita con la planicie del río Chillón. La figura 37 muestra una vista aérea satelital de la planicie aluvial del Callao y Ventanilla.

Fuente: Mapa Geológico, oficina de acondicionamiento territorial– Gobierno Regional del Callao. (INGEMMET, IGN, Cuadrante 18S. 2011)

Mapas de Microzonificación Sísmica en el Centro Histórico de Lima (Cercado de Lima y Rímac), Villa María del Triunfo y Callao. (INDECI, CISMID, et al. 2011)



Fig. 35 - Vista aérea de la planicie aluvial ventanilla - Fuente: Google Earth 2012.

3.3 RED DE ESTACIONES DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA EMPLAZADAS EN EL CALLAO

De acuerdo con el trazo que seguirá la línea 2 del metro, observamos que empieza en el distrito de Ate y atraviesa la ciudad con un recorrido de este a oeste casi paralelo al río Rímac hasta entrar a la Provincia del Callao. Los distritos que recorre antes de entrar al Callao son Santa Anita, Ate, San Luis, La Victoria y Breña.

Es necesario señalar que este recorrido fue trazado luego de estudios de tráfico urbano en zonas de alta demanda y, posteriormente, se aprobó, pasando a formar parte de la red básica urbana de línea metro por decreto supremo 059-2010 MTC. En la figura 38, se detalla el trayecto que seguirá la línea 2 del metro y el ramal de la línea 4 (color celeste). El análisis de la tesis se centra en las estaciones emplazadas en la Provincia Constitucional del Callao.



Fig. 36 - Trazo de la Línea 2 (Proinversión, 2012)

El ramal de la línea 4 (trazado celeste en la figura 4.1) sigue el recorrido de sur a norte por la Av. E. Faucett y la Av. N. Gambeta y el trazo (azul oscuro) de la línea 2 comprende la Av. O. Benavides (Colonial) y Av. Guardia Chalaca en un recorrido de este a oeste. Estos dos recorridos están emplazados

en la jurisdicción de la Provincia del Callao. A continuación, en la figura 39, se detallan las estaciones proyectadas para los dos recorridos.



Fig. 37 - Estaciones proyectadas en el Callao (Proinversión, 2012)

En la figura anterior notamos que la estación San Marcos pertenece al Cercado de Lima. La siguiente estación es Oscar R. Benavides, la cual se encuentra en el distrito de Bellavista, Callao. La línea 2 comprende las estaciones Óscar R. Benavides hasta Puerto del Callao en dirección este a oeste. Mientras tanto, el ramal de la línea 4 comienza en la estación Carmen de la Legua hasta la estación Gambeta, recorriendo de sur a norte. Para facilitar el análisis comparativo del emplazamiento geológico de las estaciones es conveniente sub-dividir en dos grupos, considerando el recorrido de cada tramo, como se indica en el párrafo anterior. A continuación, en la tabla 9, se detallan las estaciones proyectadas en la línea 2 y el ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4, en orden de este a oeste y de sur a norte, respectivamente.

Tabla 9 - Estaciones en las zonas de interés

Línea 2	Ramal Línea 4
Av. Colonial – Av. G.Chalaca	Av. Faucett – Av. Gambeta
- Óscar R. Benavides	- Argentina
- San José	- Morales Duarez
- Insurgentes	- Quilca
- Juan pablo II	- El Olivar
- Buenos Aires	- Aeropuerto
- Puerto Del Callao	- Bocanegra
	- Canta callao
	- Gambeta

3.4 EMPLAZAMIENTO GEOLÓGICO DE LAS ESTACIONES

En este capítulo se analiza el emplazamiento geológico y sísmico de las estaciones de la línea 2 y el ramal de la línea 4 en la Provincia Constitucional del Callao. Se describe, en primer lugar, el material de cobertura presente en la zona de interés y demás características geológicas. Luego de ello, la tesis

plantea una superposición del recorrido de la línea 2 sobre el mapa de tipo de suelos^(a) para identificar los puntos en donde las estaciones de interés estén emplazadas sobre suelos blandos.

(a) Anexo A3 - Mapa de clasificación de suelos, oficina de acondicionamiento territorial-Gobierno Regional del Callao. (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011)

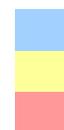
A partir de información geológica del cuadrante 18S (INGEMMET, 2005), se conoce que el cono de deyección de los ríos Rímac y Chillón están emplazados en gran parte del área urbana de Lima y Callao, con estratos de formación aluvial y de características gravo-arenosas. Sin embargo, existen zonas emplazadas sobre depósitos eólicos con material de cobertura limo-arenoso inconsolidado. Por otra parte, el promedio del nivel freático en el Callao es de 5 metros. Se advierte también la presencia de secciones lenticulares de material fino suelto. En este acápite se identificará el tipo de suelo sobre el cual se emplazan cada una de las estaciones proyectadas en la línea 2 y el ramal de la línea 4 del metro de Lima y Callao.

3.4.1 Mapa de tipo de suelos del Callao

En el capítulo 3, se describe la geología Provincia Constitucional del Callao, los grupos que la conforman, las unidades geomorfológicas y las características generales del material de cobertura presente en la planicie aluvial de Lima y Callao. Para un análisis más detallado de la estratigrafía en el emplazamiento de las estaciones de la línea 2 y el ramal de la línea 4 del metro de Lima se utilizó el mapa de clasificación de suelos de la Provincia Constitucional del Callao (ver anexo A3). Este mapa es un recurso electrónico de la oficina de acondicionamiento territorial y del Gobierno Regional del Callao. (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011)

Del mapa podemos identificar que en la zona sur de la Provincia Constitucional del Callao predominan tres estratigrafías en los distritos de Carmen de la Legua, Bellavista, La Perla y Callao. En la figura 4.3, se tiene una vista parcial del Anexo A3 en donde se identifican 3 estratigrafías de importancia:

- 1.- Arena Limosa y Limo-Arcillosa Prof. hasta 5m
- 2.- Limo Arcilloso, Arena Limosa, intercalación de turba, Prof. 10m
- 3.- Suelo de Relleno: Suelo Gravoso y Grava Limosa, Intercalaciones de CL-ML. Prof. 11m



^(c)Mapa de clasificación de suelos, oficina de acondicionamiento territorial-Gobierno Regional del Callao. (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011)

3.4.2 Superposición del recorrido sobre el Mapa de suelos

En el mapa de suelos del Callao (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011) presentado en la figura 40 se puede identificar las avenidas principales que formarán parte del eje vial de la Línea 2 y del ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4. Se observa, además, las vías secundarias que cruzan con la Línea 2 del metro, por ejemplo, el cruce de la Av. Faucett con Óscar R. Benavides (Av. Colonial) o el cruce de la Av. Argentina con la Av. Faucett.



Fig. 38 – Mapa de suelos de la Provincia Constitucional del Callao (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S, 2011)

La figura 41 muestra una vista parcial del anexo A4 donde se superpone el recorrido de la línea 2 y del ramal de la línea 4 sobre el mapa de suelos de la Provincia Constitucional del Callao. Como se detalló anteriormente, la zona de influencia del proyecto de la línea metro está emplazada básicamente sobre 3 estratos definidos (véase capítulo 4.2.1).

El trazo de líneas punteadas color negro corresponde a la línea 2 y tiene su inicio en la estación Óscar R. Benavides y final en la estación Puerto del Callao. De manera similar el trazo azul corresponde al ramal de la Línea 4 con inicio en la estación Av. Argentina llegando por el norte hasta la estación Gambeta.

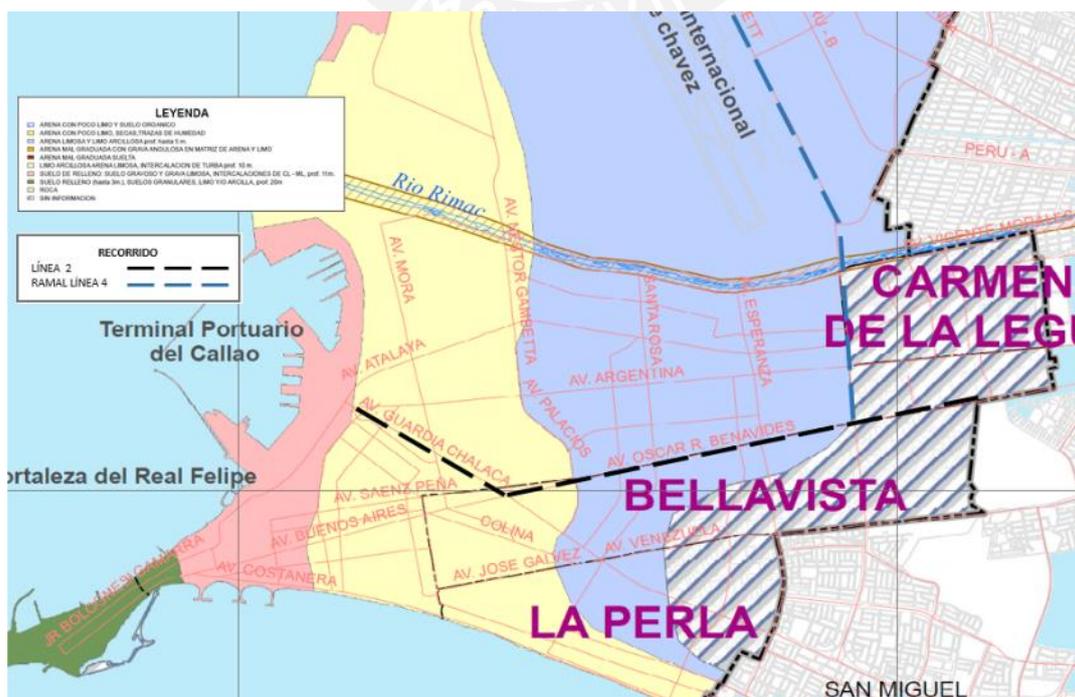


Fig. 39 - Mapa de suelos de la Provincia Constitucional del Callao (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S, 2011)

Esta información estratigráfica es de gran importancia pues resulta útil para el montaje de las tuneladoras TBM o la construcción de túneles viales y estaciones subterráneas con los métodos descritos en el marco teórico de esta tesis. También lo es para la construcción de almacenes y sub-estaciones de mantenimiento para el material rodante y centros de control.

La superposición del recorrido de estaciones de la línea 2 y del ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4 sobre el mapa de suelos de la Provincia Constitucional del Callao (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011) permitió conocer el emplazamiento geológico de cada estación de manera superficial es decir los primeros 10 o 15 metros, llamado también material de cobertura en términos geológicos. Por otra parte, el mapa geológico del anexo A1 (INGEMMET, IGN, Cuadrante 18S. 2011) detalla el basamento estratigráfico de la zona urbana de Lima y Callao el cual conforma un depósito aluvial (Conglomerado inconsolidado de matriz limo-arenosa)

A continuación, la tabla 10 muestra el tipo de suelo para los emplazamientos de las estaciones subterráneas en la Provincia Constitucional del Callao. Las estaciones de la línea 2 y el Ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4 están ordenadas en la primera y segunda columna respectivamente.

Tabla 10 - Emplazamiento geológico de las estaciones

Línea 2 Av. Colonial – Av. G.Chalaca	Ramal Línea 4 Av. Faucett – Av. Gambeta	Tipo de suelo
<ul style="list-style-type: none"> - Óscar R. Benavides - San José - Insurgentes - Juan pablo II 	<ul style="list-style-type: none"> - Argentina - Morales Duarez - Quilca - El Olivar - Aeropuerto - Bocanegra - Canta callao - Gambeta 	Arena Limosa y Limo-Arcillosa. Prof. Hasta 5m
<ul style="list-style-type: none"> - Buenos Aires - Puerto del Callao 		Limo Arcilloso, Arena Limosa, intercalación de turba, Prof. 10m

Nota: Los colores en la columna 3 corresponden al anexo A3 - Mapa de clasificación de suelos, oficina de acondicionamiento territorial- Gobierno Regional del Callao. (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011)

- 1.- Arena Limosa y Limo-Arcillosa Prof. hasta 5m
- 2.- Limo Arcilloso, Arena Limosa, intercalación de turba, Prof. 10m
- 3.- Suelo de Relleno: Suelo Gravoso y Grava Limosa, Intercalaciones de CL-ML. Prof. 11m



Dentro de la Provincia Constitucional del Callao la Línea 2 tiene 4 estaciones emplazadas sobre Arena Limosa y Limo Arcillosa (Óscar R. Benavides, San José, Insurgentes y Juan pablo II). Las dos últimas estaciones (Buenos Aires y Puerto del Callao) se encuentran sobre Limo Arcilloso y Arenas Limosas).

Por otra parte, las estaciones del ramal Faucett-Gambeta de la línea 4 tienen todas las estaciones emplazadas sobre Arena Limosa y Limo-Arcillosa, tal como se detalla en la tabla 4.2.

Según la definición de “Suelos Blandos” en el acápite 2.3 el emplazamiento de las dos últimas estaciones de la Línea 2 está sobre un perfil de suelos blandos. En el siguiente apartado (acápites 4.3) se realiza una comprobación del emplazamiento de las estaciones a través del análisis sobre el mapa de Microzonificación sísmica (INDECI, CISMID, et al. 2011).

3.5 EMPLAZAMIENTO SÍSMICO DE LAS ESTACIONES

En este acápite se analiza el emplazamiento sísmico de las estaciones de la Línea 2 y el ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4 del Metro de Lima. El mapa de microzonificación sísmica (INDECI, CISMID, et al. 2011), utilizado para el análisis, se encuentra en los anexos de esta tesis.

Se propone también un análisis del emplazamiento sísmico de las estaciones utilizando el mapa elaborado por INDECI, CISMID el año 2011 para la oficina de acondicionamiento territorial del Gobierno Regional del Callao. El análisis del emplazamiento sísmico tiene como objetivo identificar para cada estación el tipo de suelo y las características físico-mecánicas de acuerdo con la tipología propuesta por la Norma Peruana sismo-resistente N.030 – 2016.

En primer lugar, se define el término “estudio de Microzonificación”, luego se analiza los datos que proporciona el mapa sísmico y se describe de manera específica cada una de las zonas delimitadas por el estudio. Posteriormente se superpone el recorrido de la Línea 2 y el ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4 sobre el mapa de microzonificación sísmica para identificar el emplazamiento de cada estación. Finalmente, la información obtenida se contrasta con el mapa de suelos (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S. 2011) del anexo A3.

3.5.1 ¿Qué es un estudio de microzonificación sísmica?

Según la Norma de diseño sismo resistente E 030. (Acápites 2.2.1) la Microzonificación Sísmica es un estudio multidisciplinario que investiga los efectos de sismos y fenómenos asociados como licuación de suelos, deslizamientos, tsunamis y otros, sobre el área de interés. En este caso en particular para Lima metropolitana y la Provincia Constitucional del Callao.

En síntesis, un estudio de micro zonificación sísmica permite conocer las principales características físico-mecánicas de los tipos de suelos en una zona determinada. Para ello se realizan estudios de los mapas de isosistas^(a), referentes a eventos sísmicos regionales, y ensayos de medición de micro trepidaciones^(b).

El objetivo de los ensayos de micro-trepidaciones es conocer el periodo predominante de vibración del terreno y evaluar si estos podrían amplificar o no. Según el Dr. Kiyoshi Kanai (investigador pionero del método) la medición de características físico-mecánicas permite establecer una relación entre las características geológicas del terreno (estratigrafía) y su periodo predominante de vibración.

La zonificación de los tipos de suelos en área de Lima metropolitana y el Callao fue elaborada a partir del estudio de los mapas de isosistas del sismo del 3 de Octubre de 1974 el cual alcanzó intensidades

de VIII-IX en la escala Modificada de Mercalli, cerca al Morro solar en el distrito de Chorrillos y V – VI en distritos como Pueblo Libre y Breña, mientras que en el centro de Lima y Jesús María fue de VII (INDECI, CISMID, et al. 2011).

^(a) Isosistas: Representación gráfica de los niveles de intensidad de un sismo utilizando la escala Mercalli Modificada (MM) sobre un mapa.

^(b) Micro trepidaciones: vibraciones del suelo por causas naturales o artificiales con periodos entre 0.05 – 1 seg y amplitudes de 0.05 – 10 micrones.

Los mapas y estudios que se presentan en esta tesis fueron realizados por el centro peruano japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres (CISMID) y la Universidad de Chiba, Japón en el marco del Proyecto JST-JICA SATREPS "Mitigación de Desastres por Terremotos y Tsunamis en Perú".

El mapa presentado en el anexo A2 - Mapa de sismicidad, oficina de acondicionamiento territorial – Gobierno Regional del Callao. (INDECI, CISMID, et al. 2011) propone una clasificación del emplazamiento geológico superficial a través de las características físico-mecánicas del suelo (periodos de vibración natural).

La micro-zonificación sísmica de Lima Metropolitana y Callao define 5 zonas, cuyas características geológicas superficiales y propiedades físico-mecánicas se detallan a continuación:

Zona I

Conformada por afloramientos rocosos y los estratos de grava coluvial-aluvial de los pies de las laderas que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural determinados por las mediciones de micro trepidaciones (registros de vibración ambiental) que varían entre 0.1 y 0.3s. Para la evaluación del peligro sísmico a nivel de la superficie del terreno, se considera un periodo natural de $T_s=0.4$ s, correspondiendo a un suelo Tipo S1 de la norma sismo resistente peruana.

Zona II

En esta zona se incluyen las áreas de terreno conformado por un estrato superficial de suelos granulares finos y suelos arcillosos, con espesores entre 3.0 y 10m., de cuyos estratos subyace la grava aluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes del terreno determinados por las mediciones de micro trepidaciones varían entre 0.3 y 0.5s. Se considera el periodo natural del suelo en $T_s = 0.6s$, correspondiendo a un suelo de tipo S2 de la norma sismo resistente peruana.

Zona III

Esta zona está conformada en su mayor parte por los depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado suelto. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.7s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como un suelo Tipo S3 de la norma sismo resistente peruana, con un periodo natural de $T_s = 0.9$ s.

Zona IV

Esta zona está conformada por los depósitos de arena eólicas de gran espesor y sueltas, depósitos fluviales, depósitos marinos y sueltos pantanosos. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos son mayores que 0.7 s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como un suelo Tipo S4 de la norma sismo resistente peruana, con un periodo natural de $T_s = 1.2$ s (caso especial según la norma).

Zona V

La zona V representa áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos de desmonte heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado, con espesores entre 5 y 15 metros. En esta zona se incluyen también a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y que, en la actualidad, han sido urbanizados. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto, por lo que requieren un estudio específico. ^(c)

De esta manera, se establece los perfiles de suelo para la microzonificación sísmica en los principales distritos de la Provincia Constitucional del Callao. Cada zona de acuerdo a su estratigrafía y rasgos topográficos del afloramiento rocoso presenta un rango de periodos predominantes (T) y periodos de vibración naturales (Ts). La figura 42 muestra una vista del mapa completo de microzonificación sísmica en el anexo 2 (INDECI, CISMID, et al. 2011).



Fig. 40 - Mapa de sismicidad, oficina de acondicionamiento territorial Callao. (INDECI, CISMID, et al. 2011)

Se observa que en el mapa de sismicidad es distinto del mapa de suelos descrito en el acápite anterior. La diferencia está en que la micro-zonificación sísmica depende de las características físico-mecánicas del suelo (periodos de vibración), las cuales varían por el nivel freático de los emplazamientos, procesos de consolidación natural de suelos y topografía superficial.

Bajo este principio, dos emplazamientos con el mismo tipo de suelo pueden presentar factores de amplificación sísmica distintos. Los cambios en el movimiento desde la base rocosa hasta la superficie,

dependen tanto de las características propias del perfil de suelo y la forma de la superficie rocosa interior o la topografía superficial (Muñoz, 2014).

Según el Dr. Kiyoshi Kanai (investigador pionero del método de micro-trepidaciones), la medición de características físico-mecánicas permite establecer una relación entre las características geológicas del terreno (estratigrafía) y su periodo predominante de vibración.

A partir del análisis del mapa sísmico de la Provincia Constitucional del Callao (INDECI, CISMID, et al. 2011) y la estratigrafía representativa para cada zona se resume la información en la tabla 11. En la misma se plantea las equivalencias de las zonas con la tipificación del perfil de suelo propuesto en la norma sismo-resistente Peruana E 030-2016.

Tabla 11 – Equivalencias del estudio de micro-zonificación sísmica con la norma E.030

Zona	Tipo	Definición	Estratigrafía	Periodo Predominante (T)	Periodo natural (Tp)
I	S1	Roca o Suelos Muy Rígidos	Grava aluvial y afloramientos rocosos, cubiertos con material fino de poco espesor.	0.1 – 0.3	0.4
II	S2	Suelos Intermedios	Suelos granulares finos y suelos arcillosos, con espesores entre 3.0 y 10m., subyaciendo a estos estratos la grava aluvial o grava coluvial.	0.3 – 0.5	0.6
III	S3	Suelos Blandos	Depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado suelto.	0.5 – 0.7	0.9
IV	S4	Condiciones excepcionales	Depósitos de arenas eólicas de gran espesor y sueltas, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos.	> 0.7	1.2
V	-	-	Depósitos de rellenos de desmonte heterogéneos	-	-

La micro-zonificación sísmica es un análisis más detallado del emplazamiento geológico de las estaciones porque permite conocer, además de la estratigrafía referencial, las características físico-mecánicas del suelo.

El periodo predominante (T) y el periodo natural (Tp) son parámetros utilizados para el diseño sismo-resistente de estructuras de concreto armado, específicamente para la elaboración del espectro dinámico o acelerograma de diseño de acuerdo a los lineamientos de la norma sismo-resistente peruana E 030-2016. En el apartado 2.4 se detallan los “Parámetros de Sitio” para cada tipo de suelo, la tabla nro.4 muestra los mismos valores para el periodo natural (Tp) de suelos que el estudio de Micro-zonificación sísmica (INDECI, CISMID, et al. 2011).

Tabla N° 4 PERÍODOS “ T_p ” Y “ T_L ”				
	Perfil de suelo			
	S_0	S_1	S_2	S_3
T_p (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T_L (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

Nótese que, de acuerdo a norma sismo-resistente peruana E 030-2016 los perfiles S_1 y S_2 guardan relación con los periodos naturales del estudio de Micro-zonificación sísmica. Existe una variación aceptable con respecto al perfil S_3 , para el cual la Norma E 030 señala como periodo natural ($T_p=1.0$) mientras que el estudio propone el valor de $T_p=0.9$ para emplazamientos en la zona III.

Por otra parte, el perfil S_0 no figura en el estudio, pues corresponde a emplazamientos sobre roca y el perfil S_4 es considerado como “perfil de condiciones excepcionales”, para el cual la Norma E 030 demanda una clasificación basada en el EMS (estudio de mecánica de suelos).

3.5.2 Superposición del recorrido sobre el mapa sísmico del Callao

De manera análoga al análisis presentado en el acápite 3.4.2, en este apartado se estudia el emplazamiento sísmico y características físico-mecánicas de las estaciones del recorrido de Línea 2 y del ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4.

En el mapa de sismicidad (INDECI, CISMID, et al. 2011), se puede identificar las avenidas principales que formarán parte del eje vial de la Línea 2 y del ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4. Se puede observar también las vías secundarias que cruzan con la Línea 2 del metro, por ejemplo, el cruce de la Av. Faucett con Óscar R. Benavides (Av. Colonial) o el cruce de la Av. Argentina con la Av. Faucett.

La figura 43 muestra una vista parcial del anexo A5 donde se superpone el recorrido de la línea 2 y del ramal de la línea 4 sobre el mapa de sismicidad de la Provincia Constitucional del Callao (INDECI, CISMID, et al. 2011). Como se detalló anteriormente, la zona de influencia del proyecto de la línea metro está emplazada, básicamente, sobre 3 estratos definidos (véase capítulo 3.4). Sin embargo, el estudio de micro-zonificación contrasta con la información estratigráfica (material de cobertura) y características físico-mecánicas a través de los ensayos de micro-trepidación.

Tabla 12 - Emplazamiento geológico de las estaciones

Línea 2 Av. Colonial – Av. G.Chalaca	Ramal Línea 4 Av. Faucett – Av. Gambeta	Zona	Clasificación E.030		Estratigrafía
- San José	- Argentina - Morales Duarez	I	S1	Roca o Suelos Muy Rígidos	Grava aluvial y afloramientos rocosos, cubiertos con material fino de poco espesor.
- Insurgentes - Juan pablo II - Buenos Aires	- Quilca - El Olivar - Aeropuerto - Canta Callao	II	S2	Suelos Intermedios	Suelos granulares finos y suelos arcillosos, con espesores entre 3.0 y 10m., subyaciendo a estos estratos la grava aluvial o grava coluvial.
- Óscar R. Benavides	- Bocanegra	III	S3	Suelos Blandos	Depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado suelto.
- Puerto del Callao	- Gambeta	IV	S4	Condiciones excepcionales	Depósitos de arenas eólicas de gran espesor y sueltas, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos.

En el perfil tipo S1-Suelos Rígidos (Zona I) se encuentran las estaciones San José (Línea 2) y las estaciones Argentina y Morales Duarez en el trazo del Ramal de la línea 4. Tanto en el recorrido de la Línea 2 como el ramal de la Línea 4, la mayoría de estaciones (8) se encuentran emplazadas sobre un suelo tipo S2-suelos intermedios (Zona II). Estas presentan una estratigrafía con suelos granulares-finos y suelos arcillosos, con espesores entre 3.0 y 10m.

En la zona III perfil S3 (suelos blandos) se encuentran dos estaciones: Oscar R. Benavides (Línea 2) y la estación Bocanegra (Ramal Línea 4). La estratigrafía para estas estaciones la conforman depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor en estado suelto.

Finalmente, en la zona IV de suelo con condiciones excepcionales (perfil S4) se encuentran emplazadas las estaciones Puerto del Callao y la estación Gambeta. Esta zona está conformada por depósitos de arena eólicas sueltas, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos.

4 JUSTIFICACIÓN Y GEOMETRÍA BÁSICA DE LAS ESTACIONES

Para la comparación de los métodos Austríaco y Cut and Cover y el análisis de la ruta crítica en ambos casos, se utilizará los modelos de dos estaciones subterráneas, proyectadas con ambos métodos constructivos. Así mismo, el análisis del tiempo de ejecución y de los costos directos permitirá conocer las partidas que más recursos demandan y aquellas que son críticas para el cumplimiento del plazo.

El análisis se concentra en los costos directos y los tiempos de ejecución para ambos métodos constructivos sobre un emplazamiento de suelos blandos. Se asume que los costos indirectos y los gastos generales serán calculados en base al costo directo de los materiales. Este análisis de costos unitarios se realiza tomando como base las siguientes fuentes:

- Proyecto y Construcción de la estación Inés Suarez Línea 6 Metro de Santiago de Chile. Third Meeting Tunnel & Mining Lima-Perú (E. Velasco, 2013)
- Procedimiento Constructivo de la estación 20 noviembre. Línea 12 del metro de Ciudad de México. (F. Gutiérrez 2011- UNAM)

Para la actualización y comparación de costos en cada partida se utilizó las siguientes guías e índices de costos unitarios.

- Revista Costos números 278 y 279 (Lima, 2017)
- Análisis de precios unitarios – Consorcio Wari II, Ayacucho. (Provias Nacional 2011)

En este capítulo, se selecciona dos estaciones de características variables, para las cuales se plantea anteproyectos distintos, considerando la ejecución con ambos métodos constructivos y sus variantes en emplazamientos de suelos blandos, estos métodos constructivos están detallados en el marco teórico (véase capítulo 2).

El diseño e ingeniería de proyecto sigue los lineamientos de las estaciones modelo: estación Inés Suarez, línea 6 del Metro de Santiago de Chile y estación 20 de noviembre, línea 12 del Metro de Ciudad de México. Más adelante se detalla las similitudes de los emplazamientos geológicos y el detalle de la infraestructura en cada uno de los proyectos.

Finalmente, con las estaciones seleccionadas en la Provincia Constitucional del Callao y los modelos de estaciones, se plantea un anteproyecto para la construcción de estaciones de línea metro con el método Cut and Cover y el Nuevo Método Austríaco (Estaciones tipo caverna). Para efectos del análisis comparativo, los anteproyectos contemplan el metrado de materiales, los recursos necesarios y el desarrollo del cronograma maestro para cada método constructivo.

4.1 SELECCIÓN DE ESTACIONES TIPO Y SU EMPLAZAMIENTO

Las estaciones de interés para este estudio se han elegido de acuerdo a su emplazamiento geológico sobre suelos blandos y/o con alto potencial de colapso, de acuerdo al análisis del emplazamiento geológico detallado en el capítulo 3.4. Los estudios de la geomorfología local y regional de Lima Metropolitana y la Provincia Constitucional del Callao muestran algunas zonas urbanas emplazadas sobre depósitos eólicos y con presencia de índices de humedad como se observa en el mapa del anexo A3.

Tal como se vio en el capítulo 3.5, los estudios con ensayos de microtrepidaciones del CISMID han ratificado la información geológica, además de proporcionar parámetros físicomecánicos (periodos fundamentales) de los distintos tipos de suelos definidos dentro de los parámetros de clasificación de la norma sismoresistente Peruana E 030-2016.

Aparte del emplazamiento geológico y sísmico, la selección de las estaciones está sujeta al análisis presentado en capítulos anteriores y contemplan parámetros de estudios de demanda, zonificación urbana y clasificación de vías. Estas consideraciones delimitan un ámbito comparativo para las estaciones de la línea 2 y ramal de la línea 4 en la Provincia Constitucional del Callao.

De acuerdo a lo expuesto en capítulos anteriores el emplazamiento geológico contempla la estratigrafía local y las características físicomecánicas del suelo (mapas sísmicos). Por otro lado, el entorno urbano define para cada estación el estudio de demanda de usuarios, la zonificación y actividad económica y la clasificación de vías de acuerdo con el sistema vial metropolitano de Lima y Callao.

Las tablas 13 y 14 detallan cada aspecto del emplazamiento geológico y del entorno urbano para cada estación elegida. Es necesario mencionar que tienen características similares y son estaciones que no tienen conexión con otras líneas subterráneas de la línea 2 y del ramal de la línea 4 del metro de Lima y Callao.

Tabla 13 - Características geológicas y urbanas de una estación del ramal Línea 4

Estación:	Av. Bocanegra
Emplazamiento geológico	
Material de cobertura	Arena Limosa y Limo-Arcillosa. Prof. Hasta 5m
Micro zonificación sísmica	Tipo III (S3 – Suelos Blandos) Depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado suelto.
Entorno Urbano	
Demanda de usuarios Hora pico matutina (HPM)	Recorrido Sur-Norte: 2105 Recorrido Norte-Sur: 4370
Zonificación y actividad comercial	Industrial
Clasificación de vías	Av. E. Faucett (Expresa)-Av. Bocanegra (Colectora)
Tipo de intersección	Ininterrumpida

Tabla 14 - Características geológicas y urbanas de una estación de la línea 2

Estación:	Av. Óscar R. Benavides (ex Av. Colonial)
Emplazamiento geológico	
Material de cobertura	Arena Limosa y Limo-Arcillosa. Prof. Hasta 5m
Micro zonificación sísmica	Tipo III (S3 – Suelos Blandos) Depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado suelto.
Entorno urbano	
Demanda de usuarios Hora Pico Matutina (HPM)	Recorrido Este-Oeste: 11250 Recorrido Oeste-este: 935
Zonificación y actividad Comercial	Industrial
Clasificación de Vías	Av. O. Benavides (Arterial)-Av. Amezaga (Local)
Tipo de intersección	Semaforizada

De esta manera, la información presentada para cada estación resume los análisis detallados en los capítulos 4 y 5 de la presente tesis. Ambas estaciones (Óscar R. Benavides y Bocanegra) están emplazadas sobre un perfil estratigráfico tipo III (S3 – Suelos Blandos) de acuerdo a la norma sismo-resistente peruana E 030-2016. La estratigrafía de sus suelos está representada por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado suelto.

4.1.1 Estación del Ramal de la línea 4 proyectada con el Nuevo Método Austríaco

La estación proyectada con el Nuevo Método Austríaco (Estación tipo caverna) será la estación Av. Bocanegra por los siguientes motivos:

- Emplazamiento sobre una vía expresa (Av. E. Faucett), sobre la cual el flujo vehicular es ininterrumpido y las intersecciones son pasos a desnivel o intercambios viales especialmente diseñados. La construcción con el Nuevo Método Austríaco permitirá realizar los trabajos de excavación internamente mientras el flujo vehicular en la superficie continúa ininterrumpido.
- Acceso y movilidad en la zona para el acarreo de maquinarias de excavación de Muros Milán. Las vías alternas e intersecciones permiten también el flujo de vehículos pesados para el acarreo de material.

El procedimiento constructivo de una estación tipo caverna tiene como primera fase la excavación del pique circular, el cual puede ubicarse sobre una vía alterna para no interrumpir el flujo vehicular en la vía principal (Av. E. Faucett - Expresa).

La excavación de la galería de conexión (segunda etapa) y del túnel interceptación ó galería de abordaje (tercera etapa) se realizan de manera interna teniendo como frente de trabajo el pique circular previamente excavado en la primera etapa. El acarreo del material excavado se realiza por el pique con ayuda de elevadores mecánicos.

El emplazamiento geológico de la estación Av. Bocanegra se realiza sobre depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado suelto. El mapa de peligro sísmico (CISMID-

INDECI 2011) clasifica la zona como Tipo III (S3 – Suelos blandos) de acuerdo a la norma sismo-resistente Peruana E 030-2016.

La demanda proyectada al 2020 para la estación Av. Bocanegra es de 2105 pasajeros en el recorrido sur-norte y 4370 pasajeros en el recorrido norte-sur, lo que suma un total de 6475 usuarios durante la hora pico matutina (HPM). El entorno y la principal actividad económica que se desarrolla alrededor de la estación es la actividad industrial y de manufactura.

4.1.2 Estación de la línea 2 proyectada con el método Cut and Cover

La estación proyectada con el método Cut and Cover será la estación Av. Óscar R. Benavides (ex Av. Colonial) por los siguientes motivos:

- Emplazamiento sobre una intersección con la vía local (Av. Amezaga). Esto permite aplicar los planes de desvío vehicular utilizando las vías alternas y programando en paso en la intersección semaforizada.
- Acceso y movilidad en la zona para el acarreo de maquinarias de excavación de Muros Milán. Las vías alternas e intersecciones permiten también el flujo de vehículos pesados para el acarreo de material.

Es necesario mencionar que durante la primera y segunda etapa de la construcción con el método Cut and Cover la superficie estará ocupada por las obras de excavación y Muros Milán a ambos lados de la vía. Durante este periodo entrará en vigencia el plan de desvío vehicular aprobado por la municipalidad competente.

La tercera etapa de la ejecución con el método Cut and Cover contempla la reposición de la superficie y el acarreo de material interno a través de un acceso a la primera y segunda plataforma de la estación. El flujo vehicular se reestablece con normalidad durante la ejecución de esta última etapa.

El emplazamiento geológico de la estación Av. Óscar R. Benavides es sobre depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado suelto. El mapa de peligro sísmico (CISMID-INDECI, 2011) clasifica la zona como Tipo III (S3 – Suelos Blandos), de acuerdo a la norma sismoresistente peruana E 030-2016.

La demanda proyectada al 2020 para la estación Av. Óscar R. Benavides es de 11250 pasajeros en el recorrido este-oeste y 935 pasajeros en el recorrido oeste-este, lo cual suma un total de 12185 usuarios durante la hora pico matutina (HPM). El entorno y la principal actividad económica que se desarrolla alrededor de la estación es la actividad industrial y de manufactura.

De esta manera, se consolida la información general del emplazamiento geológico y urbano de las estaciones de la línea 2 y del ramal de la línea 4, ubicadas en la Provincia Constitucional del Callao. Es necesario mencionar que ambas estaciones se encuentran sobre suelos blandos (Tipo III-S3) de acuerdo con los lineamientos de la norma sismoresistente peruana E 030-2016.

El análisis del procedimiento constructivo de las estaciones con los métodos Cut and Cover y Nuevo Método Austríaco sobre perfiles de suelos blandos es precisamente el objetivo de explicación de la presente tesis.

4.2 JUSTIFICACIÓN PARA EL MODELO DE ESTACIÓN TIPO CAVERNA (NMA)

Las estaciones tipo caverna se realizan con el Nuevo Método Austríaco y comprenden principalmente 3 fases de excavación: Construcción del pique, excavación de la galería de conexión y excavación del túnel interestación o plataforma de abordó.

El modelo de referencia para la estación Av. Bocanegra (Ramal de la Línea 4) fue tomado de *Proyecto y Construcción de la estación Inés Suarez Línea 6 Metro de Santiago de Chile. Third Meeting Tunnel & Mining Lima-Perú* (Velasco, 2013), ya que esta estación presenta características similares al emplazamiento de la estación Av. Bocanegra de la Provincia Constitucional del Callao. Los aspectos similares son el emplazamiento geológico, emplazamiento sísmico y geometría de la estación proyectada. Estos se detallan en los siguientes subíndices.

El modelo referencial para el diseño de la estación Av. Bocanegra (Ramal de la Línea 4) es la estación Inés Suarez de la Línea 6 Metro del Santiago de Chile. La justificación del modelo se basa en los siguientes principios de ingeniería y diseño:

- La estación Inés Suarez está emplazada sobre un suelo similar al de Lima Metropolitana. En este caso, gran parte del área urbana de Santiago de Chile se asienta sobre depósitos de gravas aluviales y material acarreado por el Río Mapocho, el cual cruza la ciudad de noreste a suroeste.
- La sismicidad de la zona es alta por encontrarse dentro del Círculo de Fuego del Pacífico, las normas sismoresistentes chilenas son estrictas en cuanto al diseño de estructuras de este tipo, exigiendo un periodo de retorno de 5000 años para el cálculo estructural.
- La construcción de la estación Inés Suarez inició en abril de 2016. La utilización de equipos modernos como cintas transportadoras verticales, equipos hidráulicos para la colocación de bulones y bombas de concreto lanzado más pequeñas y maniobrables dan una idea del rendimiento en excavaciones sobre perfiles de grava aluvial.
- Se trata de una estación intermedia de la Línea 6 del Metro de Santiago de Chile ubicada en la comuna de Providencia (Zona residencial e industrial). A esta antecede la estación Ñuñoa y sucede la estación Los Leones. Su diseño y geometría se adapta para ser una estación intermedia con afluencia entre 4500 y 8000 mil usuarios en la hora pico matutina (HPM).

Como se detalla en los párrafos anteriores la estación Inés Suarez tiene similitudes con la estación Av. Bocanegra en términos de emplazamiento geológico y características urbanas. Además, se trata de dos estaciones intermedias que forman parte de una red de línea metro subterráneo.

estructuras de concreto armado que conforman la estación en cada una de sus fases de construcción y la geometría básica del diseño y el recubrimiento en las galerías excavadas.

4.2.1 Columna estratigráfica de la estación Inés Suarez

Como se señaló anteriormente, la estación Inés Suarez está emplazada sobre un suelo similar al de Lima Metropolitana; gran parte del área urbana de Santiago de Chile está sobre depósitos de gravas aluviales y material acarreado por el Río Mapocho, el cual cruza la ciudad de noreste a suroeste. Los ríos Rímac y Chillón conforman la planicie aluvial de Ventanilla y del Rímac; de manera análoga, el río Mapocho en Santiago de Chile conforma una planicie aluvial con estratos de gravas arenosas en su mayoría.

El entorno geológico de la zona urbana de Santiago de Chile está conformado principalmente por las siguientes estratigrafías:

Gravas aluviales

Material acarreado por los ríos Mapocho y Maipo. Se trata específicamente de gravas arenosas correspondientes a la primera y segunda depositación de ambos sistemas fluviales. Este estrato de Gravas arenosas (GW-GP) se encuentra normalmente consolidado y alcanza compacidades medias y altas en algunos sectores del área Metropolitana de Santiago de Chile.

Suelos finos limosos y arcillo-limosos

Se trata de un nivel superficial de 1 a 3m de espesor, detectado de forma continua inmediatamente bajo los rellenos superficiales y material agrícola del suelo.

Suelos arenosos

Se presentan como estratos lenticulares de arena limosa con grado de cementación variable. Se encuentran en niveles discontinuos con distribución espacial variable, no siempre detectados en los estudios de suelos.

Arenas finas

Son estratos de origen volcánico (pumicitas) constituidos por niveles lenticulares de arenas limosas con espesores menores a 5m. Estos estratos se encuentran en su mayoría en las laderas o pies de monte.

Durante las excavaciones de los piques para las estaciones: Franklin, Ñuñoa e Inés Suarez se encontraron columnas estratigráficas que guardan relación con la información general a cerca del emplazamiento geológico de las planicies aluviales de los ríos Mapocho y Maipo. En los tres registros estratigráficos, se observan las depositaciones primera y segunda de la grava arenosa y los estratos de suelos finos superficiales.

A continuación, se muestra un esquema que detalla los perfiles estratigráficos de la estación Inés Suarez de la Línea 6 del Metro de Santiago de Chile y la estación Av. Bocanegra de acuerdo a la tabla 10 del

Fig. 44 - Vista en planta de la estación Inés Suarez (Velasco, 2013)

Fase 1 – Excavación del Pique

La primera fase en la construcción de la estación Inés Suarez (tipo caverna) es la ejecución del pique, una perforación circular con un diámetro de 20 metros en la superficie y que alcanza una profundidad de 23 metros. Esta estructura lleva además anclajes perforados en el terreno y mallas electro-soldadas para el refuerzo.

Para la ejecución de obras la circunferencia del pique se divide en 6 sectores y la excavación en tres sectores alternados, cuando se alcanza 2.3 metros de profundidad se coloca la malla electro-soldada y se proyecta hormigón. El procedimiento constructivo sigue con la excavación de los otros tres sectores, así se completa un “anillo de nivel” y se prosigue hasta alcanzar los 23 metros de profundidad. Este avance restringido de 2.3 metros se produce porque la malla electro soldada contempla precisamente 2.3 metros de ancho en su fabricación. El refuerzo con anclajes perforados se realiza una vez que culmina el refuerzo del anillo de nivel con la malla electro-soldada y el hormigón proyectado. Son dos anclajes en cada uno de los seis sectores de excavación del pique.

En la tabla 15, se detallan las partidas involucradas en la ejecución del pique. Dado que el anillo de nivel es de 2.3m, una vez que se concluye la partida 1.7 (nivelación de cota de profundidad) se procede nuevamente a realizar el trazo topográfico y la excavación de un nuevo anillo de nivel. Para alcanzar los 23 metros de profundidad del pique será necesario repetir el procedimiento constructivo 10 veces, ya que cada uno de los 10 anillos de nivel conforman los 23 metros de profundidad del pique.

Tabla 15 - Partidas de la Fase 1-Estación tipo caverna

Número	Partidas – Fase 1
1.1	Obras preliminares de instalación
1.2	Trazo topográfico
1.3	Excavación del anillo de nivel
1.4	Instalación de malla electro-soldada
1.5	Proyectado de hormigón
1.6	Colocación de anclajes
1.7	Nivelación de cota de profundidad

La geometría básica del diseño del pique en la estación Inés Suarez está basada en el “anillo de nivel”. Como se explicó líneas arriba, el anillo de nivel representa la excavación realizada cada 2.3 metros. Durante la construcción del pique es conveniente realizar los cálculos en base al anillo de nivel para efectos de la programación de obra, metrado de materiales y uso de maquinarias. El procedimiento será repetitivo hasta completar los 23 metros de profundidad.

A continuación, la tabla 16, detalla las dimensiones, volúmenes y demás características generales del anillo de nivel. Posteriormente, en el capítulo 7, se explica ampliamente el metrado de materiales y programación de obra en base a la geometría básica del diseño.

Tabla 16 - Geometría básica de diseño Fase 1-Estación tipo caverna

Característica	Medida ó Cantidad
----------------	-------------------

Diámetro en planta	20 metros
Profundidad	2.3 metros
Sectores por anillo de nivel	6 sectores
Espesor de recubrimiento	15 cm
Ancho de la malla electro-soldada	2.3 metros
Numero de anclajes por anillo de nivel	12 unidades

La construcción del pique en la primera etapa del proyecto representa una excavación a cielo abierto en la cual se empleará maquinaria especializada para el acarreo de material de manera vertical. Cada anillo de nivel (2.3 metros) incrementa la profundidad del pique y, por lo tanto, la altura para el acarreo del material extraído. Las maquinarias necesarias en la primera etapa serán las siguientes:

- Cinta vertical transportadora
- 1 retroexcavadora
- Volquete
- Perforadora hidráulica
- Bomba para hormigón proyectado
- Equipo ligero para el acarreo (Bobcat)

Fase 2 – Excavación de la Galería de Conexión

Cuando el pique llega a la profundidad de 23m empieza la segunda etapa en la construcción de la estación tipo caverna. La excavación de la galería de conexión se realiza con una variante del Nuevo Método Austríaco, el procedimiento se llama Side-drift y permite un mejor control de deformaciones. Este nuevo procedimiento tiene como característica principal la utilización de un tabique provisional que divide la sección superior de la bóveda.

El tabique provisional construido con malla electro-soldada y hormigón proyectado tiene dos funciones:

- Transmitir los esfuerzos de la parte central de la corona (zona con mayor deformación) hacia el terreno.
- Dividir la parte superior de la bóveda en dos secciones para mejorar el avance realizando excavaciones paralelas en cada lado del tabique.

En la figura 45, se observa el inicio de la excavación de la galería de conexión con la variante Side-Drift del Nuevo Método Austríaco. Se puede apreciar el procedimiento de excavación en las dos cámaras paralelas divididas por el tabique provisional. El avance en paralelo permite excavar de 3 a 4 metros diarios a diferencia de los 2 metros con el procedimiento estricto del Nuevo Método Austríaco.



Fig. 45 - Excavación de la galería de conexión-Fase 2
(Constructivo 2013, ed. 34)

En la figura anterior, se observa el “paraguas” de micro-pilotes en la sección superior de la corona, dependiendo de las características del terreno se pueden usar de 25 a 40 micro-pilotes con profundidades de 3 a 4 metros. Estos participan del sostenimiento primario de la bóveda durante las excavaciones internas en las dos cámaras paralelas.

La variante Side-drift del Nuevo Método Austríaco tiene como único limitante el acceso restringido en los frentes. Las dos cámaras laterales son secciones de aproximadamente 32 m^2 lo cual dificulta el acceso de maquinaria para las tareas de excavación y/o acarreo de material. Sin embargo, al tener dos frentes de trabajo paralelos el avance por día (3 a 4 m) es mayor al del procedimiento estándar (2 m).

A diferencia de la excavación del pique en la primera etapa (excavación a cielo abierto), esta segunda fase comprende la excavación subterránea de la galería de conexión. La variante Side-Drift del Nuevo Método Austríaco tiene como principio la utilización de un tabique provisional que divide las dos galerías laterales y sirve para sostener la corona del túnel, lo cual garantiza la disminución de deformaciones en esta zona de la bóveda.

La figura 46 muestra un esquema de la geometría básica de la sección de la galería de conexión. El modelo corresponde a la estación Inés Suarez de la Línea 6 del Metro de Santiago de Chile. Se observa las dos cámaras o sub-fases de la sección de la bóveda (36.4 m^2 y 31.9 m^2) divididas por el tabique provisional construido con malla electro-soldada y hormigón lanzado. La sección del banco representa al mayor volumen de suelo por excavar con 64 m^2 de sección transversal. La contra bóveda es la sección con menor suelo por extraer y tiene 15 m^2 de sección trasversal. En total, incluyendo la contra bóveda la altura de la galería de conexión, es de 11.69 metros y tiene un anchura total de excavación de 15.71 metros.

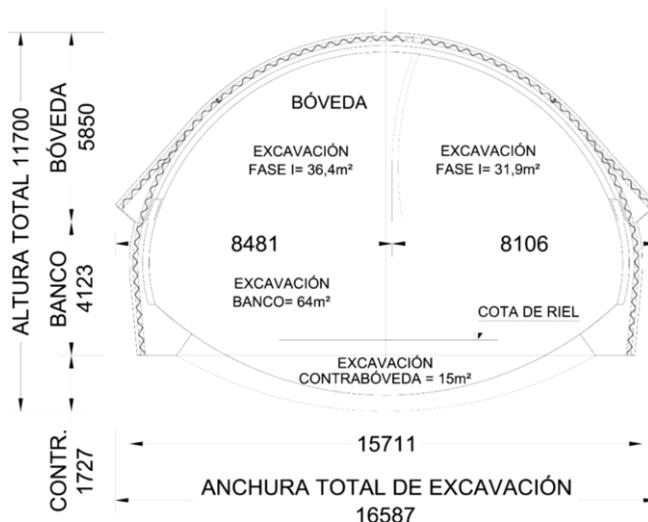


Fig. 46 - Sección transversal de la galería de conexión-Fase 2 (Salzar B, 2011)

La secuencia constructiva de la sección de la galería de conexión en una estación tipo caverna se divide en fases de acuerdo a los sectores. El primer sector en excavar es la bóveda, luego se sigue el procedimiento en el sector conocido como banco, del cual se extrae el mayor volumen de terreno. Finalmente, el sector que se encuentra por debajo de la cota de riel se llama contra-bóveda y más que una excavación se trata de un mejoramiento del terreno que luego soportará las cargas dinámicas del tráfico del metro. A continuación, en la tabla 17, se detalla las partidas más importantes durante la excavación de la galería de conexión.

Tabla 17 - Partidas de la Fase 2-Galería de conexión

Número	Partidas – Fase 2
2.1	Micropilotaje en la sección Corona
2.2	Excavación de la bóveda - Cámara A
2.3	Sostenimiento primario - Cámara A
2.4	Excavación de la bóveda - Cámara B
2.5	Sostenimiento primario - Cámara B
2.6	Excavación de la sección Banco
2.7	Excavación de la contra-bóveda
2.8	Recubrimiento definitivo del túnel

La geometría básica permite cuantificar los volúmenes de material en banco y la cantidad de hormigón proyectado que se requieren durante la excavación de la galería de conexión (segunda fase de la estación tipo caverna). En el caso de la sección transversal de la galería de conexión, las dimensiones más importantes son el volumen de material en banco y el perímetro de las secciones excavadas. A continuación, la tabla 18, detalla las dimensiones, volúmenes y demás características generales de la galería de conexión.

Tabla 18 - Geometría básica de diseño Fase 2-Estación tipo caverna

Sector	Característica	Medida ó Cantidad
Bóveda	Sección Transversal – Cámara A (bóveda)	31.9 m ²
	Perímetro – Cámara A (bóveda)	8.6 metros
	Sección Transversal – Cámara B (bóveda)	36.4 m ²

	Perímetro – Cámara B (bóveda)	9.1 metros
	Altura de la sección	5.85 metros
Banco	Sección Transversal Banco	64 m ²
	Longitud lateral Banco	8.40 metros
	Altura de la sección	4.12 metros
Contra-bóveda	Sección Transversal Contra-bóveda	15 m ²
	Longitud lateral Contra-bóveda	3.5 metros
	Altura de la sección	1.72 metros

Fase 3 – Excavación del Túnel inter-estación o galería de abordó

La última fase en la construcción de una estación tipo caverna es la fase de la excavación del túnel inter-estación o galería de abordó. Es en esta cámara donde están las plataformas de abordó para los usuarios del metro y sirve de interconexión con las otras estaciones subterráneas.

El método de excavación utilizado en esta fase es la variante Side-Drift del Nuevo Método Austríaco. La programación y secuencia del avance es similar a la segunda fase, lo que representa una diferencia importante en el inicio en dos frentes de trabajo, pues el túnel inter-estación es perpendicular al túnel de conexión.

En la figura 47, se observa la intersección entre el túnel inter-estación y la galería de conexión. La sección de la contra-bóveda en el caso del túnel inter-estación tiene una cota más profunda, pues el suelo requiere ser mejorado para la instalación de las rieles por donde circulará la línea del metro. La figura también muestra los micro-pilotes en la parte superior de la sección de la corona en ambos tramos del túnel inter-estación.



Fig. 47 - Túnel inter-estación - Fase 3 (Velasco T, 2015)

Otra diferencia importante se produce al inicio de la excavación del túnel inter-estación. Antes de la excavación y las obras de micropilotaje, el procedimiento comienza con la construcción de un arco de concreto armado que se ubica al inicio de cada sección que comunica el túnel de conexión con el túnel inter-estación. La geometría de la estructura está definida por la intersección entre la galería de conexión y el túnel inter-estación. En la figura 48, se observa el refuerzo de acero del arco que conforma la estructura previa antes del inicio del movimiento de tierras de la tercera fase.



Fig. 48 - Arco reforzado del túnel inter-estación - Fase 3 (Velasco T, 2015)

La geometría básica del túnel inter-estación (tercera etapa) es similar al diseño planteado para la galería de conexión (segunda etapa). El método Side-Drift, como se explicó anteriormente, es una variante del Nuevo Método Austríaco. La característica principal del método es que plantea el uso de un tabique provisional que divide en dos cámaras la sección superior del túnel conocida como bóveda. El movimiento de tierras se realiza en paralelo en las dos cámaras; de esta manera, el método Side-Drift tiene un mejor rendimiento que el tradicional Nuevo Método Austríaco.

La geometría básica de la sección transversal del túnel inter-estación es similar al diseño de la segunda fase (Galería de conexión). Las dimensiones son ligeramente menores con respecto al túnel de la etapa anterior. A continuación, la tabla 19 detalla las dimensiones, volúmenes y demás características generales del túnel inter-estación.

Tabla 19 - Geometría básica de diseño Fase 2-Estación tipo caverna

Sector	Característica	Medida ó Cantidad
Bóveda	Sección Transversal – Cámara A (bóveda)	28.5 m ²
	Perímetro – Cámara A (bóveda)	8.2 metros
	Sección Transversal – Cámara B (bóveda)	34.6 m ²
	Perímetro – Cámara B (bóveda)	8.7 metros
	Altura de la sección	5.60 metros
Banco	Sección Transversal Banco	58 m ²
	Longitud lateral Banco	7.80 metros
	Altura de la sección	3.85 metros
Contra-bóveda	Sección Transversal Contra-bóveda	13.5 m ²
	Longitud lateral Contra-bóveda	3.10 metros
	Altura de la sección	2.00 metros

Los túneles de la segunda y tercera etapa en la construcción de una estación tipo caverna tienen diseños geométricos y procedimientos constructivos similares. Sin embargo, hay dos consideraciones adicionales en la ejecución de la tercera etapa ó túnel inter-estación:

- La construcción del túnel inter-estación comprende una ejecución en 2 frentes de trabajo perpendiculares a la galería de conexión (segunda etapa).
- La excavación de la sección de contra-bóveda se realiza a un nivel más profundo con la finalidad de tratar el terreno y conformar superficies aptas para el tendido de rieles.

En la siguiente tabla 20, se detalla las partidas principales que están involucradas en la ejecución de la tercera etapa para la construcción de la estación tipo caverna. Se toma en cuenta las consideraciones antes mencionadas y su secuencia dentro del procedimiento constructivo del túnel inter-estación.

Tabla 20 - Partidas de la Fase 3-Túnel inter-estación

Número	Partidas – Fase 3
2.1	Construcción de arco de refuerzo en ambos frentes
2.2	Micropilotaje en la sección Corona de ambos frentes
2.3	Excavación de la bóveda - Cámara A
2.4	Sostenimiento primario - Cámara A
2.5	Excavación de la bóveda - Cámara B
2.6	Sostenimiento primario - Cámara B
2.7	Excavación de la sección Banco
2.8	Excavación de la contra-bóveda
2.9	Tratamiento y compactación de la superficie vial
2.10	Conformación del terraplén para tendido de rieles.
2.11	Recubrimiento definitivo del túnel

Las actividades antes expuestas se realizan en paralelo en ambos frentes de trabajo con un desfase de una o dos semanas. En este caso, es posible utilizar maquinaria ligera para el movimiento de tierras hasta el túnel central (galería de conexión) y maquinaria pesada a partir de este punto. La figura 49 muestra el túnel inter-estación en etapa final de acabados. Se observa las plataformas de abordaje a ambos lados del andén central por donde se tienden los rieles de metro en sentidos contrarios.



Fig. 49 - Tendido de rieles en túnel inter-estación - Fase 3
(Constructivo 2013, ed. 34)

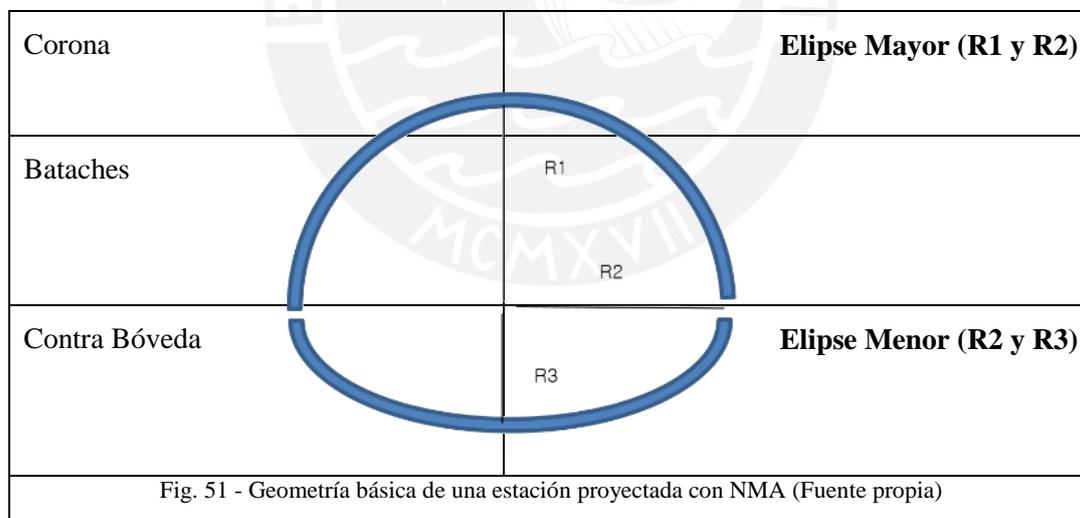
En cuanto al modelo de una estación proyectada tipo caverna, ejecutada con el NMA, este comprende una sección central por donde van tendidos los rieles y secciones laterales para poder abordar los trenes. A diferencia de una estación construida con el método Cut and Cover, esta estación no tiene niveles de

sótanos diferenciados, sino que alberga una gran sección transversal en forma elíptica, tal como se aprecia en la figura 50 correspondiente a la estación San Cristóbal de la Línea 2 del Metro de Sao Paulo, Brasil.

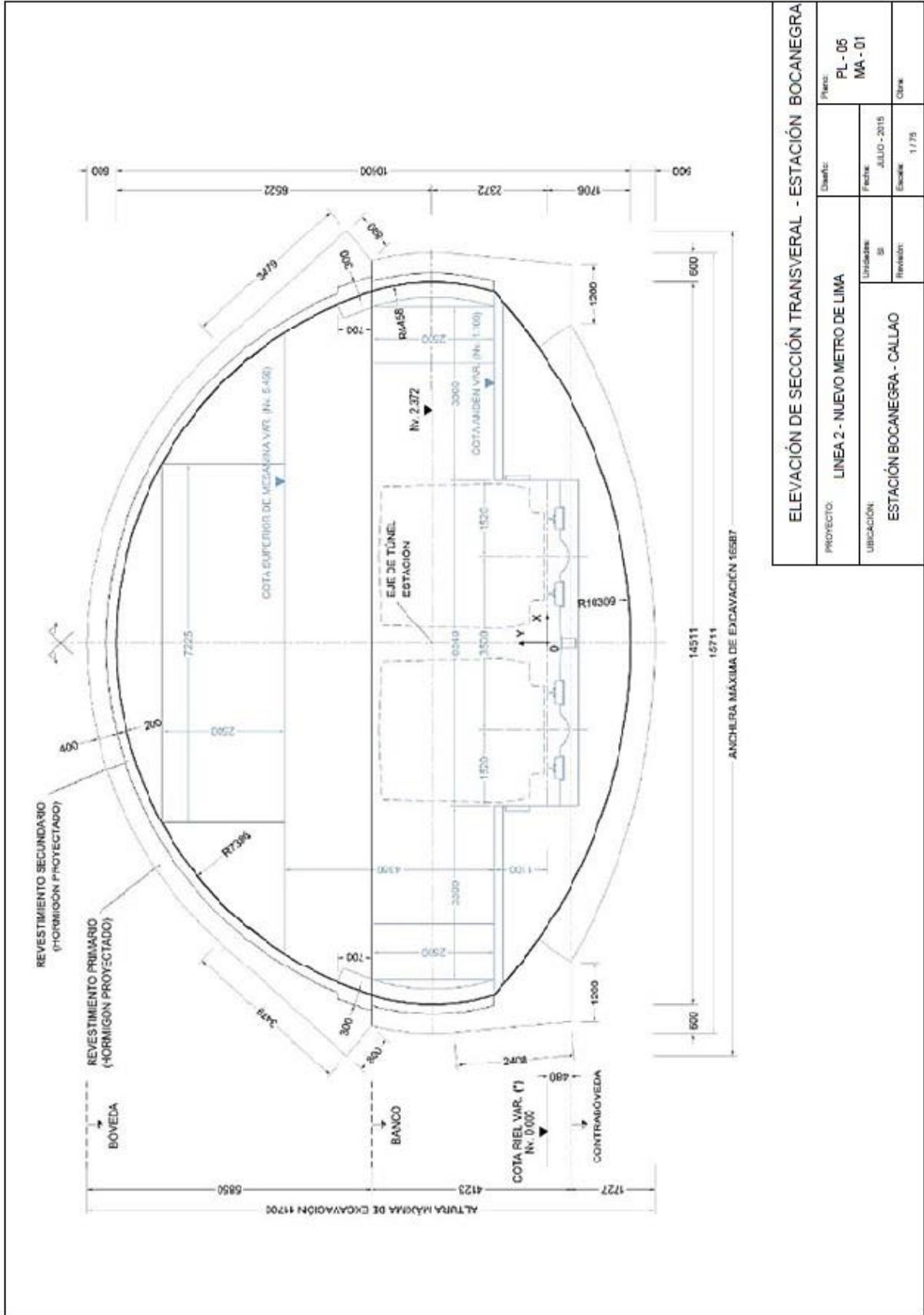


Fig. 50 - Estación Sao Cristavao – Metro Sao Paulo (Constructivo 2013, ed. 34)

Geoméricamente la sección transversal de la estación proyectada con el NMA, se puede representar con dos semi-elipses. Estas tienen en común un radio y otras dos dimensiones que representan la altura de la corona y la profundidad de la contra bóveda, elipse mayor y elipse menor, respectivamente. De esta manera, se pueden identificar las secciones que conforman cualquier túnel. A continuación, en la figura 51 se muestra la división de las secciones.



En la página siguiente, se muestra el Plano PL-05 en el cual se detalla la geometría de una sección transversal de una estación proyectada con el NMA. La adaptación se realizó tomando como base la geometría de la estación Inés Suarez de la Línea 6 del Metro de Santiago de Chile (Velazco, 2013). Este modelo es útil para cuantificar los volúmenes de materiales que demandará este tipo de estación. Dicha sección transversal se repite a lo largo de 116 metros, que es la extensión de la estación proyectada en la Av. Bocanegra en la Provincia del Callao.



4.3 JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE ESTACIÓN TIPO CUT AND COVER

Una estación a desnivel construida con el método Cut and Cover presenta 2 macro-estructuras: La zona pública o andén de usuarios y la plataforma de abordó. Esta última es el espacio por donde circula el sistema de transporte ferroviario. En este acápite se presenta el modelo, justificación y la geometría básica de la estación proyectada con el método Cut and Cover.

La presencia de suelos blandos en la Provincia Constitucional del Callao supone ciertas limitantes en el procedimiento constructivo de estructuras subterráneas como túneles o estaciones de línea metro, principalmente por presentar un material de cobertura conformado por materiales limo arcilloso de compacidad media – alta y depósitos eólicos. Para tener en cuenta los precedentes en la construcción de una estación de tipo Cut and Cover, es necesario el análisis de un emplazamiento desfavorable con características similares tanto en estratigrafía y sismicidad.

El modelo referencial para el diseño de la estación Av. Óscar R. Benavides (Línea 2 del Metro de Lima), fue tomado de *Procedimiento Constructivo de la estación 20 Noviembre. Línea 12 del metro de Ciudad de México* (Gutiérrez, 2011). El emplazamiento geológico, sísmico y el tipo de intersección vial de la estación modelo son algunas de las características en común con la estación Av. Óscar R. Benavides ubicada en la Provincia Constitucional de Callao.

El modelo referencial para el diseño de la estación Av. Óscar R. Benavides es la estación 20 de Noviembre de la Línea 12 del Metro de Ciudad de México. La justificación del modelo se sostiene en las similitudes geológicas y estructurales de ambas estaciones. A continuación, se detallan los puntos de referencia para el modelo de estación Cut and Cover:

- La estación 20 de Noviembre está emplazada sobre un suelo de estratigrafía arena arcillosa con material de cobertura arcilloso, con humedad moderada cercana al 12% y de compacidad media-alta. Estas características se extienden en gran parte del distrito federal mexicano, pues el emplazamiento está formado por depósitos lacustres con material de cobertura acarreado de las partes altas del valle.
- La Provincia Constitucional del Callao presenta también estos perfiles de estratigrafía limo-arenosa (SC-SP), en algunos casos, con nivel freático de 5 a 8 m de profundidad y una humedad relativa cercana al 15% dependiendo de la cercanía con el litoral peruano. El material de cobertura está compuesto por depósitos aluviales y eólicos en algunos casos puntuales.
- La sismicidad de ambos emplazamientos, Ciudad de México y Lima es alta por encontrarse dentro del Círculo de Fuego del Pacífico. El 7 y 19 de septiembre de 2017, se registraron dos sismos de 7.1 y 8.2 grados en la escala de Richter en ciudad de México y otras provincias, los cuales dejaron cerca de 190 000 damnificados. En Perú, el último evento sísmico tuvo lugar el 15 de agosto de 2007 en Chincha y Pisco, a 150 km al sur de Lima- En esa ocasión, se registró 7.9 grados en la escala de Richter.

- La construcción de la estación 20 de Noviembre se realizó en 2012 como parte de una ampliación de la Línea 12 de la capital mexicana. Para la construcción de la estación se utilizaron almejas hidráulicas durante la etapa de excavación con lodo bentonítico de los muros Milán.
- La estación 20 de Noviembre se trata de una estación intermedia de la Línea 12 del Metro de Ciudad de México, ubicada en el distrito de Benito Juárez (zona residencial). A ella antecede la estación Zapata y continúa la estación Insurgentes sur.

En la figura 52, se observa el emplazamiento de la estación 20 de Noviembre, de la Línea 6 del metro de Ciudad de México. Está ubicada en el cruce de las avenidas 20 de Noviembre y avenida Coyoacán, de 4 y 2 carriles respectivamente. Esta estación pertenece a una zona residencial de densidad media y está cerca al Hospital Nacional 20 de Noviembre. Su diseño y geometría está adaptado para ser una estación intermedia con afluencia entre 3200 y 9000 mil usuarios en la hora pico matutina (HPM).



Fig. 52 - Emplazamiento de la estación 20 de Noviembre- Línea 6 CDMX (Gutierrez, 2011)

Sobre lo expuesto en la página anterior se concluye que la estación 20 de Noviembre (Línea 6 del Metro CDMX) se encuentra en un emplazamiento geológico similar al de la estación Av. Óscar R. Benavides de la Línea 2 del Metro de Lima. Ambas estaciones se encuentran en un entorno de uso residencial medio y son puntos intermedios de las redes de paraderos que conforman.

La estación 20 de Noviembre presenta un diseño característico de las estaciones construidas con el método Cut and Cover, un primer nivel o sótano destinado al tránsito de usuarios y/o comercios pequeños y la plataforma de abordaje en un segundo sótano. En capítulos posteriores se detalla la estratigrafía del emplazamiento y el diseño geométrico proyectado para la estación 20 de Noviembre. Columna estratigráfica de la estación 20 de Noviembre

4.3.1 Columna estratigráfica característica de la estación 20 de noviembre

Gran parte del área metropolitana de la Ciudad de México está emplazada sobre un gran depósito lacustre de matriz areno-arcillosa, material que yacía en el fondo del lago Texcoco. El material acarreado de las partes altas del valle de México conforma estratos con espesores de 4 a 6 metros de matriz

arcillosa. Los estratos más representativos de la capital mexicana están conformados por arcillas de consistencia media y alta con contenido de arenas.

El entorno geológico del área metropolitana de la Ciudad de México está conformado principalmente por las siguientes estratigrafías:

Arcillas

Material que conforma los depósitos lacustres del valle de México. La arcilla característica presenta plasticidad alta de consistencia blanda, con coloración café oscuro y presencia de arenas finas, en algunos casos material orgánico en descomposición. Se encuentra desde los 2m hasta 10m de profundidad aproximadamente.

Arcillas Arenosas

Material acarreado de las partes altas del valle que juntamente con los depósitos lacustres conforman un estrato de matriz arcillosa (SC) de baja plasticidad con presencia de arena. El estrato presenta consistencia dura. Se encuentra desde los 10m hasta 17m de profundidad aproximadamente.

Arena Arcillosa

La matriz sobre la cual descansan los depósitos lacustres se trata de un nivel estratigráfico conformado por depósitos coluvio-aluviales representado por arenas arcillosas (SC-SP) muy compactas de color café-amarillo que contienen grava de TM 1”½. El espesor se extiende desde los 17m de profundidad hasta los 40m, aproximadamente.

La configuración estratigráfica antes mencionada es el emplazamiento de la estación 20 de Noviembre. Teniendo en cuenta que el nivel de cimentación de una estación intermedia proyectada con el método Cut and Cover es de 15 a 20 metros, la estación objeto de estudio esta cimentada sobre una matriz compuesta de Arena Arcillosa y estratos superiores blandos (Arcillas de plasticidad alta y arcillas arenosas).

Por otra parte, los estratos más representativos de la Provincia Constitucional del Callao están conformados por matrices de Arena Limosa y Limo-Arcillosa hasta una profundidad de 5m y en algunos casos específicos por depósitos eólicos. Estos perfiles, además, presentan un nivel freático de 3 a 5 metros, lo cual convierte a estos emplazamientos en suelos con alto potencial de colapso o perfiles blandos.

A continuación, se presenta un esquema con las columnas estratigráficas de la estación 20 de Noviembre de la Línea 6 del Metro de Ciudad de México y de la estación Av. Benavides de acuerdo con la tabla 10 del acápite 3.4 referente al emplazamiento geológico de las estaciones de la Línea 2 del Metro de Lima y Callao.

Columna estratigráfica Est. 20 Noviembre		Columna estratigráfica Est. Av. Benavides (Ex Colonia)	
////// //////	0 a 2m (Suelo Agrícola)	////// //////	0 a 2m (Suelo Agrícola)
+.-+. +.-+. +.-+. +.-+. +.-+. +.-+. +.-+.	2 a 10m Arcilla (SC) Alta plasticidad	/-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/	2 a 5m Arena Limosa (SM) Compacidad suelta
+.-+. +.-+. +.-+. +.-+. +.-+. +.-+. +.-+.	10 a 17 m Arcilla arenosa (SC) plasticidad media, consistencia dura	/-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/	5 a 15m Arena Limosa (SM) Compacidad media
/-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/ /-/-/	17 a 40m arenas arcillosas (SC-SP)	o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o- o-o-o-	15 a 35m Grava arenosa (GW) Compacta

4.3.2 Descripción y geometría básica de la estación 20 Noviembre

El modelo y la geometría para el diseño de la estación Av. Óscar R. Benavides de la Línea 2 del Metro de Lima y Callao están basados en el procedimiento constructivo realizado para la construcción de la estación 20 de Noviembre, línea 12 del Metro de Ciudad de México. Este procedimiento se basa en el método Cut and Cover descrito el acápite 2.8.

La ventaja estructural del método Cut and Cover radica en que su sistema de cimentación se basa en plateas y muros hincados que aprovechan el rozamiento lateral en sus paredes para transmitir esfuerzos al terreno. El diseño estructural propuesto corresponde a un análisis y predimensionamiento para un periodo de retorno de 5000 años tal como lo mencionan las Bases para a la Adjudicación de la Línea 2 del Metro de Lima y el ramal de la Línea 4 (Proinversión, 2012).

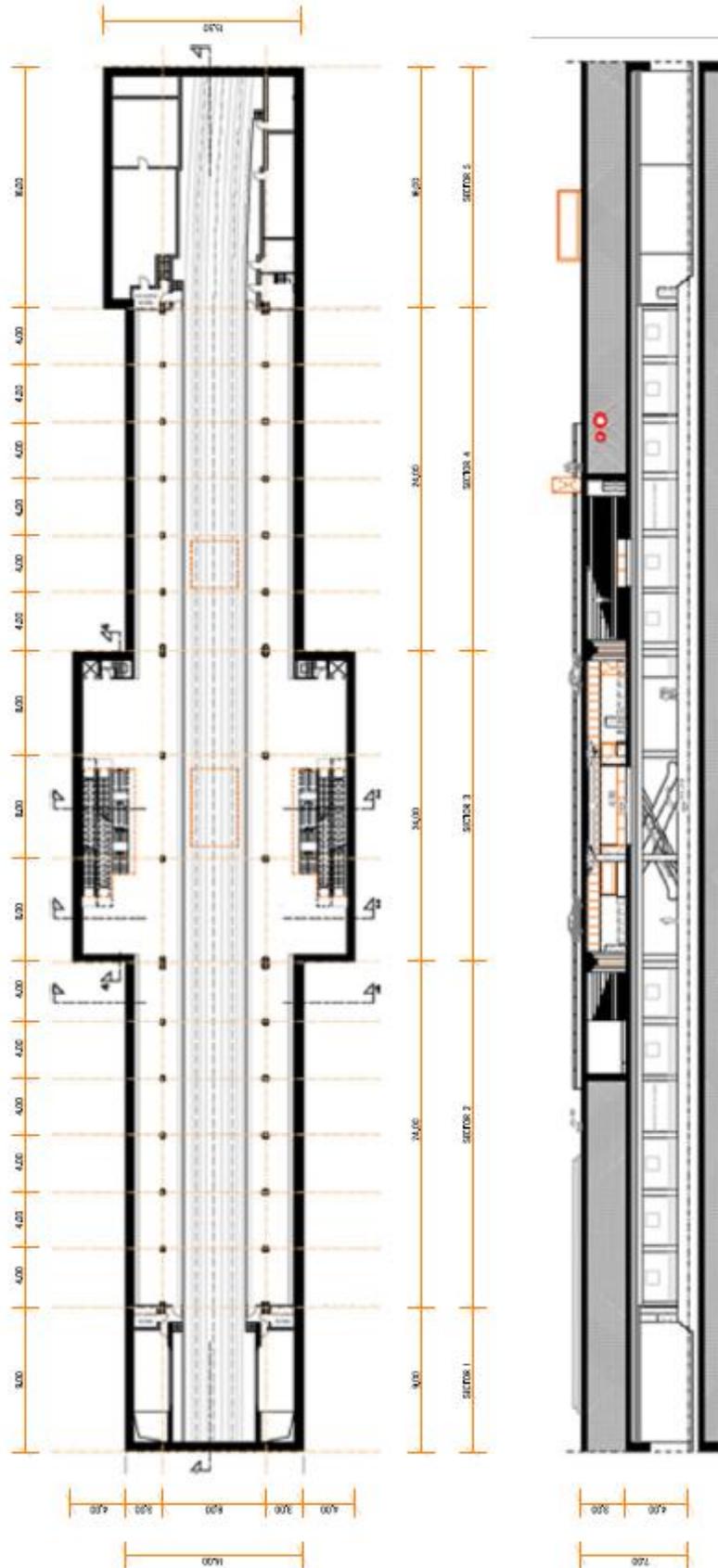
A continuación, se presentan imágenes de la estación 20 de Noviembre, línea 12 del Metro de Ciudad de México. La figura 53 (izquierda) muestra el detalle del sistema estructural propuesto con vigas prefabricadas transversales, las cuales transmiten sus esfuerzos hacia los muros Milán dispuestos lateralmente. Este sistema es el mecanismo fundamental planteado en el método Cut and Cover. Por otro lado, la figura 54 (derecha) muestra el ingreso y paso a desnivel desde la vía pública hacia la estación 20 de Noviembre.



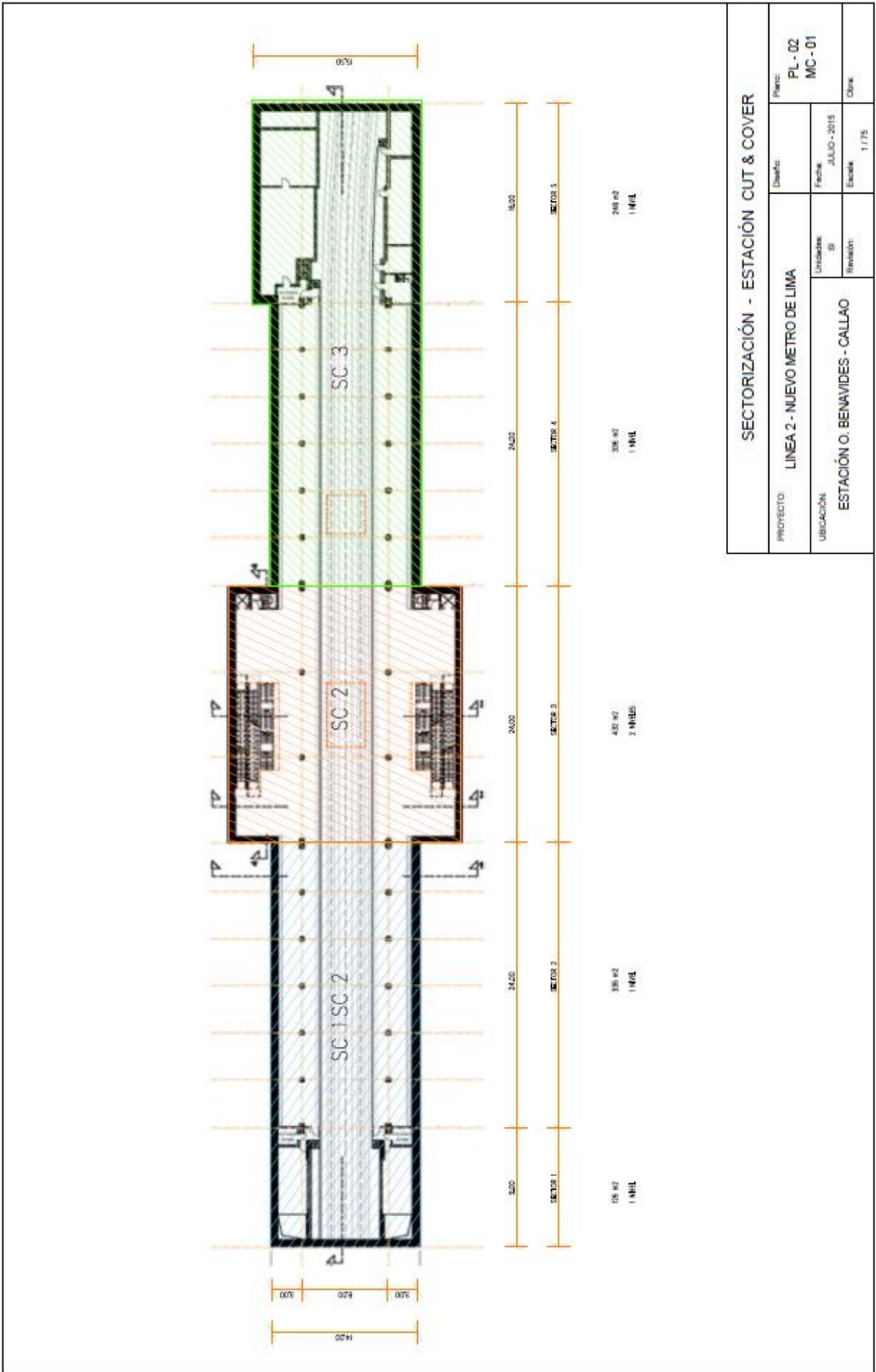
Fig. 53 y 54 - Emplazamiento de la estación 20 de Noviembre- línea 6 CDMX (Gutierrez, 2011)

En las páginas siguientes se plantea el diseño estándar de una estación a desnivel construida con el método Cut and Cover, En primer lugar, se detalla la geometría y vista en planta de la estación Av. Oscar R. Benavides (ex. Av. Colonial) y un plano auxiliar propuesto para la sectorización. Se adjuntan los siguientes planos:

- El plano E-08 muestra la vista en planta y elevación de una estación a desnivel proyectada con dos sótanos, típica en lugares donde hay una alta demanda de usuarios y/o áreas destinadas al comercio.
- El plano E-09 muestra la sectorización que se proyecta para la construcción de este tipo de estación a desnivel. En el plano siguiente, se puede observar el detalle de cada sector en el que se dividió la estación con el fin de organizar mejor los frentes de trabajo.



SECTORIZACIÓN - ESTACIÓN CUT & COVER			
PROYECTO:	LÍNEA 2 - NUEVO METRO DE LIMA	Diseño:	PL - 02 MC - 01
UBICACIÓN:	ESTACIÓN O. BENAVIDES - CALLAO	Fecha:	JULIO - 2015
		Unidades:	SI
		Revisión:	
		Escala:	1 / 75
		Obras:	



PROYECTO: LINEA 2 - NUEVO METRO DE LIMA		Escala: PL - 02 MC - 01	
UBICACIÓN: ESTACIÓN O. BENAVIDES - CALLAO		Unidades: 01	Fecha: JULIO - 2015
		Revisión:	Escala: 1 / 75
			Códec:

5 METRADO Y PROGRAMACIÓN DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS

Para los proyectos de construcción de estaciones de una red de líneas metro se suele llevar un control lineal en volumen de producción y material excavado. Los avances físicos y presupuestos globales se calculan en base a metros lineales de vía construidos. Este enfoque permite llevar un control unitario en las siguientes partidas:

- Metros lineales de túnel excavado y sostenido
- Material excavado sobrante
- Metros lineales de vía férrea construida.
- Metros lineales de túnel revestido y reforzado
- Metros de perímetro estabilizados (Muros pantalla)

En lo que corresponde al movimiento de tierras, la cuantificación del volumen de material extraído responde al diseño de cada una de estas. No obstante, existen ciertos parámetros de diseño en los cuales los niveles de sótanos requeridos responden a la demanda de usuarios. Por ejemplo, las estaciones Baquedano y Los Héroes de la red de metro de Santiago de Chile, ubicadas en zonas de alta demanda, tienen hasta 2 sótanos con alturas de 6 y 8 metros cada uno, las cuales son necesarias para organizar el intercambio y transbordo entre las líneas 1 y 2 (estación Los Héroes) y líneas 1 y 6 (estación Baquedano).

La ruta crítica de un proyecto vial está fuertemente marcada por un parámetro maestro que son los metros lineales de vía construidos. Para nuestro caso serían los metros lineales de túnel excavado y sostenido. Por lo general, un dato muy importante a tomar en cuenta es el diámetro del túnel, ya que esta dimensión se mantendrá constante durante todo el proyecto. A partir de esta información, podemos cuantificar los volúmenes de material excavado con el fin de lograr un avance controlado por metro lineal de vía construida.

5.1 ESTACIÓN AV. ÓSCAR R. BENAVIDES (MÉTODO CUT AND COVER)

Dadas las características de la estación presentada en los planos E-08 y E-09, el modelo se adapta al emplazamiento de la estación Oscar R. Benavides de la Línea 2 del Metro de Lima. Esta estación ubicada en la avenida del mismo nombre (ex Av. Colonial) y se proyecta sobre un área urbana de dos características: Industrial y comercial, (Ver ANEXO A).

La primera característica se da porque el parque industrial de carga comercial aérea ADUANAS comprende movimiento de maquinarias y productos de manufactura. La segunda característica se relaciona con la actividad comercial-zonal debido a la existencia de condominios de vivienda y centros educativos cercanos.

De acuerdo con la columna estratigráfica referencial presentada en el acápite 4.3.1, se proyecta que la cimentación tanto de la platea como de los muros hincados descansen sobre el estrato resistente GP-GM. Sin embargo, es necesario considerar en el proceso constructivo la presencia del nivel freático en los 2.20 metros de profundidad.

5.1.1 Medrado y recursos necesarios

En la hoja de cálculo 5.301 (medrado general de una estación a desnivel) se muestra a detalle los datos generales del proyecto *Construcción de la estación Oscar R. Benavides*. Los volúmenes y cantidades están calculados a partir de la sectorización planteada en el plano E-09 y siguiendo la geometría correspondiente.

De manera general, podemos observar que la construcción de la estación Oscar R. Benavides comprenderá el sostenimiento lateral de 194 ml repartidos en 1910 m² proyectando la construcción de muros de hormigón armado y muros pantalla anclados al terreno. Además, se puede leer que la reposición de vía superficial para el transporte de vehículos es de 1478 m². En lo referente a los volúmenes de suelo extraído, se tiene 8800 m³ considerando un factor de esponjamiento de 1.18.

El Medrado Sectorizado comprende las principales partidas y se realizó tomando en cuenta el método constructivo del Cut and Cover con Muros Milán para la construcción de la estación Oscar R. Benavides. El volumen de concreto requerido responde a un análisis del diseño y las cantidades de acero estructural para las partidas de elementos estructurales. Para su estimación se usaron ratios de construcción para vigas, columnas y placas.

Seguidamente las hojas de cálculo 5.302 y 5.308 muestran el requerimiento general de maquinaria pesada para la construcción de una estación subterránea con el método Cut and Cover. Además, se clasifica cada maquinaria en subtipos según su funcionalidad. De esta manera, se logra hacer una síntesis comparativa de acuerdo a las horas hombre (HH) y horas máquina (HM).

Las maquinarias pesadas se subdividen en las siguientes tipologías:

- Maquinaria para extracción de material
- Maquinaria para el Transporte y acarreo de material
- Herramientas
- Obra y seguridad

Finalmente, en la hoja de cálculo 5.305 se resume las partidas más importantes para la ejecución de una estación con el método Cut and Cover en un emplazamiento como el de Callao.

HOJA DE CÁLCULO 5.301 METRADO GENERAL DE UNA ESTACIÓN DE METRO A DESNIVEL

DATOS GENERALES DEL PROYECTO

Proyecto:	Línea 2 - Nuevo metro de Lima
Distrito:	Callao
Estación:	TS 04 Oscar R. Benavides
Plano:	E 09

SECTORIZACIÓN DE LA ESTACIÓN - TS 04 OSCAR R. BENAVIDES

Sótano 1	NTP S1	-3.50 m
Sótano 2	NTP S2	-9.30 m
	Z	-11.50 m

Muro Milan : alto : largo : ancho	11.50 m 6 m 0.6 m	SECTORIZACIÓN					TOTAL
		Sótano 2			Sótano 1		
SECTORIZACION	Ratio Global	Und.	SC 1	SC 2	SC 3	SC 2_1	
Planta		m2	588	462	636	462	2148 m2
Muros Milan 4.5x11.5m x 50cm	41.4	m3/mu und	14	8	18		40 und
Muros Milan Metros lineales		und	84	48	100		232 und
	155.4	m2/muro					
Volumen de suelo en banco		m3	3410	2680	3689	1617	11396 m3
MOVIMIENTO DE TIERRAS							
Volumen de suelo en banco		m3	3410	2680	3689	1617	11396 m3
F. esponjamiento (GP)	1.18						
Volumen de suelo (suelto)		m3	4024	3162	4353	1908	13447 m3
Excavacion masiva		m3	2831	2348	2944		8123 m3
Eliminacion y transporte de material	1.18	m3	3340	2771	3473		9585 m3
Excavacion de zanjas para guiado de almeja		ml	84	48	100		232 ml
Excavacion con almeja hidraulica		m3	580	331	745		1656 m3
Estabilizacion con lobo bentonitico	1	kg/m2	2176	1243	2797		6216 kg
Eliminacion de material excedente	4%	m3	113	94	118		325 m3
Anclaje de muros pantalla 3.50x2.00m		m2	93	184	93		370 m2
MUROS MILAN (CUT and COVER Sistem)							
Concreto muros milan _ 210kg/cm2		m3	580	331	745		1656 m3
Acero para muros milan	95	kg/m3	55062	31464	70794		157320 kg
Curado de muros milan		m2	2176	1243	2797		6216 m2
ELEMENTOS VERTICALES							
Columnas 60x60 (cantidad / SC)		und	10	8	10	8	36 und
longitud		m	5.8	5.8	5.8	3.5	21 m
Metrado lineal		ml	58	46	58	28	190 ml
Volumen en concreto E.Verticales		m3	21	17	21	10	69 m3
Acero en E.Verticales	204.38	Kg/m3	4267	3414	4267	2060	14009 kg
Encofrado de E.Verticales		m2	139	111	139	67	457 m2
ELEMENTOS HORIZONTALES							
Vigas Prefabricadas 60x40		und	5	4	5	4	18 und
longitud		m	14	20	14	20	68 m
Metrado lineal		ml	70	80	70	80	300 ml
Volumen en concreto E.Horizontales		m3	17	19	17	19	72 m3
Acero en E.Horizontales	179.2	Kg/m3	3011	3441	3011	3441	12902 kg
Encofrado de E.Horizontales		m2	168	192	168	192	720 m2
LOSAS WAFLE							
Losa Wafle h= 35cm		m2	588	462	636	462	2148 m2
Concreto 210 x m2	0.65	m3/m2	382	300	413	300	1396 m3
Encofrado		m2	588	462	636	462	2148 m2
Curado de losas Wafle		m2	1176	924	1272	924	4296 m2
OBRAS DE ASFALTADO							
Reposición de via superficial		m2	588	462	636		1686 m2
Carpeta asfaltica 3" 7.6 cm	7.6	cm	45	35	48		128 m3
Base granular h= 25 cm	25	cm	147	116	159		422 m3
Sub base h= 20 cm	20	cm	118	92	127		337 m3
Construccion de via ferrea		ml	12	24	12		48 ml

HOJA DE CÁLCULO 5.302 REQUERIMIENTO GENERAL DE MAQUINARIA

COSTO HORARIO DE EQUIPO

Proyecto:	Línea 2 - Nuevo metro de Lima
Estación:	TS 04 Oscar R. Benavides
Metodo constructivo:	Cut and Cover

Septiembre 2015

TIPO DE CAMBIO : \$1.00 S/. 3.30

CÓDIGO	EQUIPO MECÁNICO	CANT.	POTENCIA HP	CAPACIDAD	PESO KG	COSTO DE POSESIÓN S/.	COSTO DE OPERACIÓN S/.	COSTO HORARIO S/.
ET01	Draga Almeja Hidraulica RD-3 154-193 HP 0.75-1.6 y3	2	154-193	0.75-1.6 y3	22150	116.23	92.3	208.53
TR03	Cintas transportadoras Verticales C4 C5 45-64 HP	1	45-64		1400	56.32	32.21	88.53
TR01	Grua portico	1		60 tn	20000	123.4	56.7	180.1
OS01	Ventilador Korfman	1				27.4	7.89	35.29
TR02	Elevador cabina 8P	1		6 Tn	3000	32.43	16.78	49.21
TR04	Camion Cisterna 2000 Gal	1	145-165	2000 gl	13000	45.36	72.26	117.62
TR05	Camion Volquete 15 m3	2		15 m3	30000	47.86	142.32	190.18
TR06	Camioneta 4x2 - 2Cab	2	90	750 kg	1850	10.99	45.46	56.45
ET02	Cargador S/llantas 160-195 HP 3.5 YD3	2	160-195	3.5 y3	18585	105.05	99.37	204.42
HE01	Teodolito	2		90 kw	20	9.62		9.62
HE02	Mira topografica	2			50	0.31	0.714	1.024
OS01	Mezcladora de concreto de 11 p3	2	23	11-12 p3	2200	14.02	9.88	23.9
HE02	Martillo neumatico 21-24 Kg	4			24	6.45	1.57	8.02
OS03	Pavimentadora sobre orugas 69 HP 10'	1	69		12000	52.17	60.88	113.05
ET04	Retroexcavador S/Orugas 115-165 Hp 0.75-1.6 Y3	1	115-165	0.75-1.6 y3	23400	127.18	97.09	224.27
ET05	Retroexcavador S/llantas 115-165 Hp 1.2 Y3	2	115-165	1.2 y3	20000	114.3	85.64	199.94
OS04	Rodillo Liso Vibr autop 70-100 HP 7-9T	1	70-11	7.3 Tn	7300	19.6	57.17	76.77
OS05	Rodillo Neumatico Autop 81-100 HP 5.5-20 TN	1	81-100	5.5-20 Tn	5500	18.54	52.55	71.09
HE03	Vibrador de concreto 4 HP 2.4"	4	4		50	3.06	4.57	7.63
HE04	Zaranda Vibratoria	3			7000	12.44	21.22	33.66

Tipologia de maquinaria

ET	Extraccion de material
HE	Herramientas
TR	Transporte y acarreo
SO	Obra y Seguridad

HOJA DE CÁLCULO 5.304 - PRESUPUESTO DE ESTRUCTURAS- ESTACIÓN OSCAR R. BENAVIDES					PR	2.8	
					Area Techada	1478 m2	
PRESUPUESTO 01 - PRE CRONOGRAMA							
Presupuesto	0102004	EST. Oscar R. Benavides			Costo al	17/09/2015	
Subpresupuesto	001	ESTRUCTURAS					
Lugar	LIMA - LIMA - Callao						
Item	Código	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.	Porcentaje
01		OBRAS PROVISIONALES				91,264.37	4.19%
01.01		OFICINAS Y ALMACEN DE OBRA	und	1.00	6,166.11	6,166.11	
01.02		MALLA DE PROTECCION	m	150.00	54.93	8,239.50	
01.03		BAÑO DE OBRA	glb	2.00	904.38	1,808.76	
01.06		TRAZO Y REPLANTEO	mes	2.00	6,525.00	13,050.00	
01.07		CERCO METALICO	m	200.00	300.00	60,000.00	
01.09		COMEDOR Y VESTUARIO	glb	1.00	2,000.00	2,000.00	
02		OBRAS PRELIMINARES				52,008.82	2.39%
02.01		DEMOLICION DE CIMIENTOS EXISTENTES	m	80.00	25.46	2,036.80	
02.02		DEMOLICION DE CARPETA ASFALTICA	m2	1,700.00	12.00	20,400.00	
02.02		MOVILIZACION Y DESMOVILIZACION DE EQUIPOS Y MAQUINARIAS	glb	2.00	3,240.00	6,480.00	
02.03		TRANSPORTE VERTICAL de obra	mes	3.00	7,697.34	23,092.02	
03		MOVIMIENTO DE TIERRAS				370,009.11	16.98%
03.01		EXCAVACION MASIVA Y ELIMINACION	m3	8,100.00	16.70	135,270.00	
03.02		EXCAVACION DE ZANJAS PARA GUIADO DE ALMEJA	ml	235.00	35.71	8,391.85	
03.03		EXCAVACION CON ALMEJA HIDRAULICA	m3	1,660.00	32.00	53,120.00	
03.04		ESTABILIZACION CON LODO BENTONITICO	kg	6,220.00	4.50	27,990.00	
03.05		ELIMINACION DE DESMONTE O MATERIAL EXCEDENTE	m3	320.00	16.70	5,344.00	
03.06		ANCLAJE DE MUROS PANTALLA	ml	370.00	378.09	139,893.26	
04		CONCRETO SIMPLE				15,033.82	0.69%
04.01		CONCRETO CIMIENTOS CORRIDOS MEZCLA 210kg/cm2	m3	40.00	252.36	10,094.40	
04.02		ENCOFRADO DE CIMIENTOS	m2	164.00	21.89	3,589.96	
04.03		SOLADO e=2" MEZCLA 1:12 CEMENTO HORMIGON	m2	126.00	10.71	1,349.46	
05		ZAPATAS AISLADAS				68,033.59	3.12%
05.01		CONCRETO ZAPATAS AISLADAS f'c=210 kg/cm2	m3	63.00	267.27	16,838.01	
05.02		ENCOFRADO Y DESENCOFRADO NORMAL EN ZAPATAS AISLADAS	m2	422.00	21.89	9,237.58	
05.03		ACERO PARA ZAPATAS AISLADAS	kg	12,950.00	3.24	41,958.00	
06		MUROS MILAN (CUT and COVER System)				959,334.64	44.02%
06.01		CONCRETO MUROS MILAN _ 210kg/cm2	m3	1,660.00	257.98	428,246.80	
06.02		ACERO PARA MUROS MILAN	kg	157,700.00	3.24	510,948.00	
06.03		CURADO DE MUROS	m2	6,216.00	3.24	20,139.84	
07		COLUMNAS				83,796.69	3.85%
07.01		CONCRETO COLUMNAS f'c=210 kg/cm2	m3	69.00	258.31	17,823.39	
07.02		ENCOFRADO Y DESENCOFRADO NORMAL EN COLUMNAS	m2	475.00	40.36	19,171.00	
07.03		ACERO PARA COLUMNAS	kg	14,103.60	3.24	45,695.66	
07.04		CURADO DE COLUMNAS	m2	522.00	2.12	1,106.64	
08		VIGAS PREFABRICADAS				67,424.50	3.09%
08.01		CONCRETO VIGAS f'c=210 kg/cm2	m3	72.00	258.31	18,598.32	
08.02		ENCOFRADO Y DESENCOFRADO NORMAL EN VIGAS	m2	220.00	31.92	7,022.40	
08.03		ACERO PARA VIGAS	kg	12,902.40	3.24	41,803.78	
08.04		CURADO DE VIGAS PRE	m2	1,230.00	2.12	2,607.60	
09		LOSAS MACIZAS H=0.20				35,403.02	1.62%
09.01		CONCRETO LOSA MACIZA f'c=210 kg/cm2	m3	52.30	266.21	13,922.78	
09.02		ENCOFRADO Y DESENCOFRADO NORMAL EN LOSA MACIZA	m2	261.52	41.61	10,881.85	
09.03		ACERO PARA VIGAS	kg	2,447.05	3.24	7,928.44	
09.04		ACABADO DE LOSA	m2	261.76	8.08	2,115.02	
09.05		CURADO DE LOSA	m2	261.76	2.12	554.93	
10		LOSAS WAFLE H=0.20				311,593.49	14.30%
10.01		CONCRETO LOSA WAFLE f'c=210 kg/cm2	m3	925.00	266.21	246,244.25	
10.02		ENCOFRADO Y DESENCOFRADO NORMAL EN LOSA WAFLE	m2	2,148.00	26.55	57,029.40	
10.03		ACERO PARA LOSA WAFLE	kg	601.25	3.24	1,948.05	
10.04		CURADO DE LOSA	m2	2,275.64	2.80	6,371.79	

PRESUPUESTO 01 - PRECRONOGRAMA							
Presupuesto	0102004	EST. Oscar R. Benavides			Costo al	17/09/2015	
Subpresupuesto	001	ESTRUCTURAS					
Lugar	LIMA - LIMA - Callao						
Item	Código	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.	Porcentaje
11		REPOSICIÓN DE SUPERFICIE				100,287.72	4.60%
11.01		SUB BASE GRANULAR	m3	337.00	28.73	9,682.01	
11.02		BASE GRANULAR	m3	422.00	48.67	20,538.74	
11.03		IMPRIMACION BITUMINOSA	m2	1,700.00	0.75	1,275.00	
11.04		CARPETA ASFALTICA EN CALIENTE 3" (7.5 cm)	m3	128.00	211.70	27,097.60	
11.05		ASFALTO DILUIDO MC 30	gln	509.99	7.53	3,840.25	
11.06		CEMENTO ASFALTICO PEN 120 150	gln	4511.03	5.81	26,209.08	
11.07		ADITIVO MEJORADOR DE ADHERENCIA	kg	170.74	16.37	2,795.04	
11.08		DRENAJE LATERAL	ml	250.00	35.40	8,850.00	
12		ESCALERAS				20,295.61	0.93%
12.01		CONCRETO ESCALERA f'c=210 kg/cm2	m3	13.92	266.21	3,705.64	
12.02		ENCOFRADO Y DESENCOFRADO NORMAL EN ESCALERAS	m2	261.52	54.35	14,213.61	
12.03		ACERO PARA ESCALERA	kg	576.56	3.16	1,821.93	
12.04		CURADO DE LOSA	m2	261.52	2.12	554.42	
13		OTROS				4,722.60	0.22%
13.01		TECNOPOR 2"	und	180.00	8.81	1,585.80	
13.02		JUNTAS EN MUROS MILAN	m	240.00	13.07	3,136.80	
COSTO DIRECTO						2,179,207.98	

HOJA DE CÁLCULO 5.305 - RESUMEN DE LAS PARTIDAS EN LA EJECUCIÓN DEL MÉTODO CUT&COVER

Resumen de Partidas - Est. Oscar R. Benavides

Presupuesto : 0102004
 Proyecto : EST. Oscar R.
 Lugar : LIMA - LIMA - Callao

CÓDIGO	PARTIDAS	COSTO DIRECTO			
		Real	Acumulado	Relativo Acumulado	Relativo
01	MUROS MILAN	959,334.64	959,334.64	44	44.0%
02	MOVIMIENTO DE TIERRAS	370,009.11	1,329,343.75	61	17.0%
03	LOSAS WAFLE H=0.20	311,593.49	1,640,937.24	75	14.3%
04	REPOSICION DE SUPERFICIE	100,287.72	1,741,224.96	80	4.6%
05	OBRAS PROVISIONALES	91,264.37	1,832,489.33	84	4.2%
06	COLUMNAS	83,796.69	1,916,286.02	88	3.8%
07	ZAPATAS AISLADAS	68,033.59	1,984,319.61	91	3.1%
08	VIGAS PREFABRICADAS	67,424.50	2,051,744.11	94	3.1%
09	OBRAS PRELIMINARES	52,008.82	2,103,752.93	97	2.4%
10	LOSAS MACIZAS H=0.20	35,403.02	2,139,155.95	98	1.6%
11	ESCALERAS	20,295.61	2,159,451.56	99	0.9%
12	CONCRETO SIMPLE	15,033.82	2,174,485.38	100	0.7%
13	OTROS	4,722.60	2,179,207.98	100	0.2%
COSTO DIRECTO			2,179,207.98		

HOJA DE CÁLCULO 5.308 - HORAS MAQUINA - ESTACION CUT & COVER															
HORAS MAQUINA - ESTACION OSCAR R. BENAVIDES.															
CÓDIGO EQUIPO MECÁNICO	CANT.	COSTO HORARIO S/.	OBRAS PROVISIONALES	OBRAS PRELIMINARES	MOVIMIENTO DE TIERRAS	MUROS MILAN (Cut&Cover)	CONCRETO SIMPLE	ZAPATAS AISLADAS	COLUMNAS	VIGAS PREFABRICADAS	LOSAS MACIZAS H=0.20	LOSAS WAFLE H=0.20	REPOSICIÓN DE SUPERFICIE	ESCALERAS	COSTO TOTAL S/.
ET01	2	208.53													0.00
TR03	1	88.53			32	32	32	32	32	32	32	32	32		22663.68
TR01	1	180.1				22	22	22	22	22	22	22	22	4	82125.60
OS01	1	35.29													0.00
TR02	1	49.21													0.00
TR04	1	117.62			20	20	20	20	20	20	20	20	20	16	95977.92
TR05	2	190.18			32	32	32	32	32	32	32	32	32		48686.08
TR06	2	56.45			20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	39740.80
ET02	2	204.42			32	32	32	32	32	32	32	32	32	20	109569.12
HE01	2	9.62			16	16	16	16	16	16	16	16	16		1231.36
HE02	2	1.024			16	16	16	16	16	16	16	16	16		131.07
OS01	2	23.9													0.00
HE02	4	8.02			20	20	20	20	20	20	20	20	20		641.60
OS03	1	113.05												16	7235.20
ET04	2	224.27													0.00
ET05	2	199.94			20	20	20	20	20	20	20	20	20		44786.56
OS04	1	76.77												20	6141.60
OS05	1	71.09												20	5687.20
HE03	4	7.63			12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4150.72
HE04	3	33.66			16	16	16	16	16	16	16	16	16		5116.32
														Sub Total	473894.83

5.1.2 Cronograma de ejecución para el método Cut and Cover

Para la estimación de tiempos de ejecución se tomó como guía el procedimiento constructivo de los paneles tipo Milán (método Cut and Cover). Para el caso de la estación del Oscar R. Benavides los paneles proyectados son de 5m de ancho por 7m de profundidad y un espesor de 60 cm.

La maquinaria que se necesita para este tipo de excavación se llama “pala tipo almeja hidráulica”. Las eficiencias y consumo de combustible se tomaron del manual *Procedimiento constructivo de la estación 20 de noviembre, Línea 12 –CDMX*.

En la figura 55, se muestra en la parte derecha el procedimiento de excavación del panel, básicamente en 3 secciones. A continuación, en la parte izquierda se ilustra la manera del vaciado de hormigón.

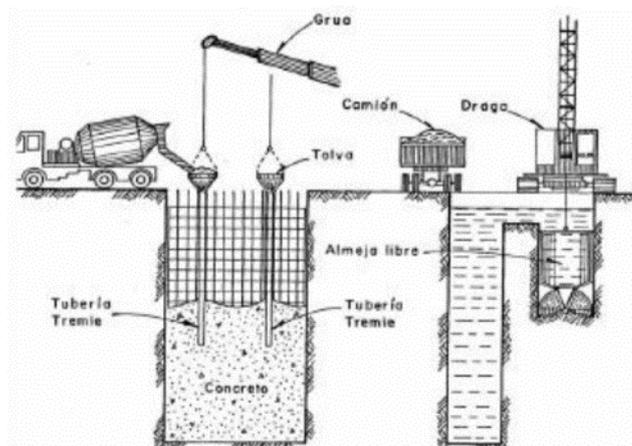


Fig. 55 - Procedimiento constructivo panel tipo Milán (Gutierrez, 2011)

En la tabla 21 se detallan los recursos necesarios y el tiempo estimado para la construcción de un panel lateral de tipo Muro Milán. Es necesario mencionar que el método contempla una secuencia descrita en el marco teórico, la cual se tomó en cuenta para la propuesta del cronograma de ejecución.

Para la cuantificación de recursos se tomó el APU de un proyecto vial análogo y para el caso de la partida de acero se optó por la cuantificación con ratios estructurales. Ambas fuentes también fueron utilizadas para la formulación del presupuesto base.

Tabla 21 - Cuantificación de recursos para panel tipo Muro Milán

Panel de Muro Milán 5x7x60cm	Mano de obra	Materiales	Equipo
Trabajos preliminares	12 HH		15 H – Equipo Liviano
Movimiento de tierras	6HH-O 3HH-T	21m3 en banco	6 H – Equipo liviano 15 H – Equipo Pesado
Concreto f'c 210		21 m3	4H – Liviano
Acero	14 HH – O 4 HH -T	1400 kg – G60	5H - Liviano

5.1.3 Metodología para la programación de obra

La manera de programar el avance de una obra de acuerdo a una serie de trabajos repetitivos se llama tren de trabajo. Este término es utilizado como una herramienta en la filosofía Lean Construction, la cual plantea un avance controlado por actividades y partidas que conforman la ruta crítica del proyecto.

El método sugiere identificar, en primer lugar, las partidas que más recursos demanden; en segundo lugar, se reconocen las actividades más representativas de cada una de estas partidas. Se notará que la partida identificada está presente en la ruta crítica del proyecto y además esta enlazada con otras actividades que agregan valor al producto final.

Por ejemplo, en el caso de las edificaciones urbanas, se identifica que la partida de concreto armado es la que más recursos demanda; como parte del procedimiento constructivo la subpartida de vaciado de concreto sería la actividad principal o representativa para este caso. Podemos mencionar que en el caso de la partida de concreto armado nos referimos a elementos estructurales tanto verticales como horizontales. Esta metodología sirve también para hacer un análisis en planta y sectorizar el emplazamiento de una obra con el fin de proyectar más de un frente de trabajo.

En una obra de infraestructura vial subterránea, las partidas más importantes son la de movimiento de tierras y la de estructuras de concreto armado. En el método Cut and Cover, observamos que ninguna de estas partidas se podrá ejecutar si antes no se realiza los Muros Milán, que son en sí, la característica principal de este método constructivo.

A continuación, en la hoja de cálculo 5.307, se detalla la programación de las subpartidas para la construcción de los muros Milán. El avance físico corresponde al procedimiento constructivo presentado en el marco teórico de la presente tesis. Esta partida de los Muros Milán es el tren de trabajo para la programación de toda la obra, ya que es el inicio de otras partidas importantes como el movimiento de tierras o las estructuras de concreto armado internas de la estación. En la página siguiente, se muestra la hoja de cálculo 5.306 que contiene el cronograma general de la estación.

HOJA DE CÁLCULO 5.307 - ESTACIÓN (CUT&COVER) - TREN DE TRABAJO	
Cronograma semanal del tren de trabajo	
CONSTRUCCIÓN DE LA ESTACIÓN OSCAR R. BENAVIDES	Abril
	Mayo
	Semana 1 Semana 2 Semana 3 Semana 4 Semana 5 Semana 6
	Lu Ma Mi Jue Vie Sab
SUPUESTOS	
Frente de trabajo liberado	
Excavacion nivel - 0.30m	
Estabilizacion de superficie para transito de maquinaria	
Construccion de zanjas laterales guia	
OBRAS PRELIMINARES	
Abastecimiento de combustible	
Abastecimiento de Lodo bentonitico	
Capacitacion / Instrucción de personal	
Señalización y ubicación de maquinarias	
MOVIMIENTO DE TIERRAS	
Excavación con almeja hidraulica en paralelo	
Estabilizacion con lodo bentonitico	
Acarreo/Transporte de material excedente	
ACERO	
Armado de Acero	
Obras de izaje del Acero Armado	
CONCRETO	
Vaciado de Muros Milan	

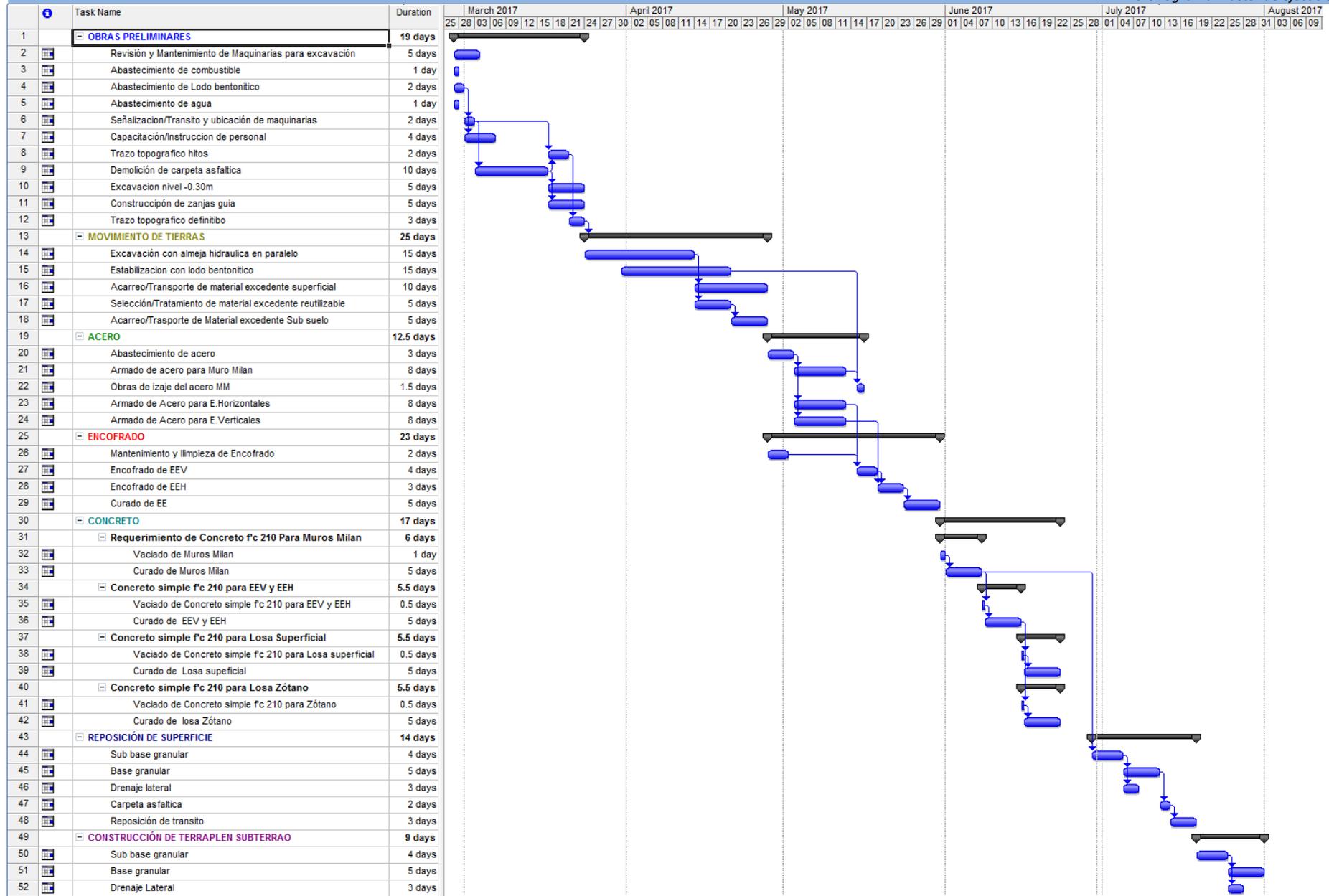
Secuencia de avance Muros Milan

■ Tren de trabajo 1 Avance en Tunel 5m
■ Tren de trabajo 2 Tiempo estimado 2 semanas



HOJA DE CÁLCULO 5.306 - ESTACIÓN CUT & COVER - CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN

Cronograma master de ejecución



5.2 ESTACIÓN AV. BOCANEGRA (NUEVO MÉTODO AUSTRÍACO)

La estación proyectada con el Nuevo Método Austríaco (NMA) está ubicada en cruce de las avenidas Bocanegra y Elmer Faucett. Esta estación pertenece al ramal de la Línea 4 en la red del Metro de Lima Metropolitana.

Una de las principales características de una estación proyectada con el NMA es que inicia su avance después de la construcción de una bóveda o pique de diámetro 20 a 25m, la cual llega a alcanzar una profundidad de 20 metros aproximadamente, coincidiendo con la cota de fondo de la sección de contra bóveda del túnel (eje de vía férrea subterránea). La figura 56 muestra una vista elevada de la bóveda construida para iniciar la excavación del túnel en la estación Inés Suárez del metro 6 de Santiago de Chile.



Fig. 56 - Bóveda de inicio – Estación Inés Suarez, Línea 6 Santiago (Velasco, 2013)

Por otro lado, la estación proyectada con el NMA supone la demanda de fuertes volúmenes de Shotcrete o concreto proyectado con fibras metálicas. Esto con la finalidad de otorgar al conjunto una estructura flexible la cual pueda resistir los fenómenos de convergencia y subsidencia, descritos en el marco teórico (ver acápite 2.5). La figura 57 muestra el detalle de las mallas electro soldadas previas a la segunda capa de hormigón proyectado.



Fig. 57 - Enmallado previo a la segunda capa de hormigón (Velasco, 2013)

5.2.1 Metrado y recursos necesarios

La hoja de cálculo 5.401 contiene el metrado de estructuras para la construcción de la estación con el Nuevo Método Austríaco, en el cual los volúmenes y dimensiones están de acuerdo al diseño geométrico

del túnel presentado en el plano PL-05. El presupuesto general se encuentra en la hoja de cálculo 5.402, el cual fue realizado de acuerdo al metrado planteado en la presente tesis y con los costos de partidas actualizados al 2016, según la revista costos y presupuestos utilizando la metodología de las ratios globales.

HOJA DE CALCULO 5.401 - METRADO GENERAL DE UNA ESTACIÓN DE METRO
CONSTRUIDA CON EL NUEVO METODO AUSTRIACO

DATOS GENERALES DEL PROYECTO

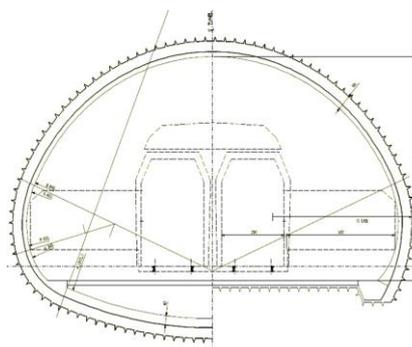
Proyecto:	Línea 2 - Nuevo metro de Lima
Distrito:	Callao
Estación:	TS 02 Av. Bocanegra
Fecha:	Jul-15
Plano:	E 09

SECTORIZACIÓN DE LA ESTACIÓN - TS 02 AV. BOCANEGRA_CALLAO

Geometría del Tunel	R (m)	r (m)	Area (m ²)	Perimetro (m)	Semi perimetro (m)
Elipse en Corona	8	6	150.80	44.27	22.13
Elipse en Bóveda	8	3	75.40	36.42	18.21
Extención de la estación	110				
			226.20	40.34	

RECUBRIMIENTO	inch	cm
Shotcrete =	4.00	10.16
Shotcrete con fibra metalica =	3	7.62
Recubrimiento Final =	6	15.24

CAVERNA DE ACCESO	Und.
Diametro =	20 m
Superficie =	314.16 m ²
Perimetro =	62.832 m
Espesor =	0.25 m
Profundidad =	12 m



SECTORIZACIÓN						TOTAL
Descripción	Ratio Global	Und.	SC 1	SC 2	SC 3	
Longitud		ml	35.0	40.0	35.0	110 ml
Planta	12.8 m ² /ml	m ²	448.0	512.0	448.0	1408 m ²
Volumen de suelo en banco	113.10 m ³ /ml	m ³	3958.4	4523.9	3958.4	12441 m ³
OBRAS PRELIMINARES						
Excavacion de la Caverna de Acceso Nivel 7m (Banco)	314.16 m ³ /mp	m ³				2199 m ³
Excavacion de la Caverna de Acceso Nivel 12m (Banco)	314.16 m ³ /mp	m ³				1571 m ³
F. esponjamiento (GP)	1.18					
Acarreo de material - Caverna		m ³				4449 m ³
Concreto para Caverna	15.708 m ³ /mp	m ³				188 m ³
Acero para caverna	150 kg/m ³	kg				28274 m ³
Encofrado mecanico sobre riel	62.832 m ² /mp					754 m ²
Micropilotaje ϕ 4" - 1m		und	241.0	275.5	241.0	757 und
Longitud del pilote 4m		m	964.1	1101.8	964.1	3030 m
Cobertura efectiva de micropilote 3m	15 und/3ml					

18.0%

MOVIMIENTO DE TIERRAS TUNEL							
Volumen de suelo en banco		m3	3958.4	4523.9	3958.4	12441 m3	
F. esponjamiento (GP)	1.18						
Acarreo de material (suelto)		m3	4670.9	5338.2	4670.9	14680 m3	
Excavacion con Oruga (Banco)/Elipse superior	75.40 m3/ml	m3	2638.9	3015.9	2638.9	8294 m3	66.7%
SOSTENIMIENTO PRIMARIO							
Primera capa de shotcrete f'c 210 / Fraguado Rapido	2.25 m3/ml	m3	78.7	90.0	78.7	247 m3	
Colocacion de serchas metalicas/Pernos de anclaje	22.13 m/ml	m	774.7	885.4	774.7	2435 m	
Segunda capa de shotcrete C/ Fibras metalicas	1.69 m3/ml	m3	59.0	67.5	59.0	186 m3	
Bulones para el sostenimiento de serchas	11.07 und/ml	und	387.4	442.7	387.4	1217 und	
EXCAVACIÓN DE LA DESTROZA							
Excavacion de los bataches/Plataformas	26.39 m3/ml	m3	923.6	1055.6	923.6	2903 m3	23.3%
Concreto para bataches/ Calzaduras	0.45 m3/ml	m3	15.8	18.0	15.8	50 m3	
Acero Para Bataches/Calzaduras	205.3 kg/m3	kg	3233.5	3695.4	3233.5	10162 kg	
EXCAVACIÓN DE LA CONTRA BOVÉDA							
Excavacion de Conta bóveda (banco)	11.31 m3/ml	m3	395.8	452.4	395.8	1244 m3	10.0%
Concreto para contra bóveda	0.9 m3/ml	m3	31.5	36.0	31.5	99 m3	
Acero para contra bóveda	205.3 kg/m3	kg	6467.0	7390.8	6467.0	20325 kg	
Sistema de drenaje	2 m/ml	ml	70.0	80.0	70.0	220 ml	
Impermeabilizacion contra bóveda Geomembrana PVC	12.80 m2/ml	m2	448.0	512.0	448.0	1408 m2	
Pegamento THF contra bóveda		m2				141 m2	
REVESTIMIENTO FINAL							
Geotextil No tejido / Elipse superior	22.13 m2/ml	m2	774.7	885.4	774.7	2435 m2	
Geomembrana PVC / Elipse superior	22.13 m2/ml	m2	774.7	885.4	774.7	2435 m2	
Pegamento THF - Elipse superior		m2				243 m2	
Construccion de rieles para encofrado	2 m/ml	ml	70.0	80.0	70.0	220 ml	
Encofrado con carro de Avance	22.13 m2/ml	m2	774.7	885.4	774.7	2435 m2	
Avance cada 10-15m	10 m	und	3.5	4.0	3.5	11 und	
Juntas entre Vaciados de Recubrimiento Final	31.24 m/10m	m	109.3	125.0	109.3	344 m	
Vaciado de revestimeinto Final f'c 210	4.48 m3/ml	m3	156.9	179.3	156.9	493 m3	
CIMENTACION SUPERFICIAL							
Zapatatas Aisladas		und		8.0		8 und	
Concreto en Zapatatas Aisladas f'c=210 kg/cm2	2.6 m3/und	m3		20.8		21 m3	
Encofrado y desencofrado en Zapatatas aisladas normal	4 m2/und	m2		32		32 m2	
Acerto para Zapatatas aisladas	205.3 Kg/m3	kg		4270.24		4270 kg	
ELEMENTOS VERTICALES							
Columnas 60x60 (cantidad / SC)		und	0	8.0	0	8.0 und	
longitud		m	0.0	4.5	0.0	4.5 m	
Metrado lineal		ml	0	36.0	0	36.0 ml	
Volumen en concreto E.Verticales		m3	0	13.0	0	13.0 m3	
Acero en E.Verticales	204.38 Kg/m3	kg	0	2648.8	0	2648.8 kg	
Encofrado de E.Verticales		m2	0	86.4	0	86.4 m2	
ELEMENTOS HORIZONTALES							
Vigas Prefabricadas 60x40		und	0	4.0	0	4.0 und	
longitud		m	0.0	16.0	0.0	16.0 m	
Metrado lineal		ml	0	64.0	0	64.0 ml	
Volumen en concreto E.Horizontales		m3	0	23.0	0	23.0 m3	
Acero en E.Horizontales	179.2 Kg/m3	kg	0	4708.9	0	4708.9 kg	
Encofrado de E.Horizontales		m2	0	153.6	0	153.6 m2	
LOSAS WAFLE							
Losa Wafle h= 35cm		m2		512.0		462 m2	
Concreto 210 x m2	0.65 m3/m2	m3	0	11332.9	0	300.3 m3	
Encofrado		m2	0	512.0	0	462 m2	
Curado de losas Wafle		m2	0	1024.0	0	924 m2	
MUROS ANCLADOS							
Muros anclados 3mx4m		m2	75		75	151 m2	

HOJA DE CÁLCULO 5.402 PRESUPUESTO DE ESTRUCTURAS - ESTACIÓN AV. BOCANEGRA						PR	2.8
PRESUPUESTO 002 - PRE CRONOGRAMA							
Presupuesto	102005	EST. Av. Bocanegra					
Subpresupuesto	2	ESTRUCTURAS					
Lugar	LIMA - LIMA - Callao						
Item	Código	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.	Porcentaje
1		OBRAS PROVISIONALES				91,264.37	4.06%
1.1		Oficinas y almacén de obra	und	1.0	6,166.11	6,166.11	0.27%
1.2		Malla de proteccion	m	150.0	54.93	8,239.50	0.37%
1.3		Baño se obra	glb	2.0	904.38	1,808.76	0.08%
1.4		Trazo y replanteo	mes	2.0	6,525.00	13,050.00	0.58%
1.5		Cerco perimetrico	m	200.0	300.00	60,000.00	2.67%
1.6		Comedor y vestuario	glb	1.0	2,000.00	2,000.00	0.09%
2		OBRAS PRELIMINARES				639,727.61	28.43%
2.1		Excavacion de la Caverna de Acceso Nivel 7m (Banco)	m3	2,199.1	14.3	31,447.42	1.40%
2.2		Excavacion de la Caverna de Acceso Nivel 12m (Banco)	m3	1,570.8	18.2	28,588.56	1.27%
2.3		Ex_Acarreo de material - Caverna	m3	4,448.5	6.5	28,915.29	1.28%
2.4		Concreto para Caverna	m3	188.5	252.36	47,568.85	2.11%
2.5		Acero para caverna	kg	28,264.0	3.24	91,575.36	4.07%
2.6		Encofrado mecanico sobre riel	m2	754.0	41.2	31,064.14	1.38%
2.7		Micropilotaje ϕ 4" - 1m	m	3,030.0	125.60	380,568.00	16.91%
3		MOVIMIENTO DE TIERRAS EN TUNEL				246,368.04	10.95%
3.2		Ex_Acarreo de material (suelto)	m3	14,680.1	6.50	95,420.45	4.24%
3.3		Excavacion con Oruga (Banco)/Elipse superior	m3	8,293.8	18.20	150,947.60	6.71%
4		SOSTENIMIENTO PRIMARIO				192,850.87	8.57%
4.1		Concr_Primer capa de shotcrete f'c 210 / Fraguado Rapido 4"	m3	247.4	162.00	40,074.78	1.78%
4.2		Colocacion de serchas metalicas/Pernos de anclaje	m	2,434.8	36.4	88,626.54	3.94%
4.3		Concr_Segunda capa de shotcrete C/ Fibras metalicas 3"	m3	185.5	185.00	34,323.31	1.53%
4.4		Bulones para el sostenimiento de serchas/ P. Anclaje	und	1,217.4	24.50	29,826.24	1.33%
5		EXCAVACIÓN DE LA DESTROZA				93,894.10	4.17%
5.1		Excavacion de los bataches/Plataformas	m3	2,902.8	16.70	48,477.40	2.15%
5.2		Concreto para bataches/ Calzaduras	m3	49.5	252.36	12,491.82	0.56%
5.2		Acero para bataches/ Calzaduras	kg	10,162.0	3.24	32,924.88	1.46%
6		EXCAVACIÓN DE LA CONTRA BÓVEDA				174,312.67	7.75%
6.1		Excavacion de Conta bóveda (banco)	m3	1,244.1	16.70	20,776.03	0.92%
6.2		Concreto para contra bóveda	m3	99.0	252.36	24,983.64	1.11%
6.3		Acero para contra bóveda	kg	20,325.0	3.24	65,853.00	2.93%
6.4		Sistema de drenaje	ml	220.0	35.40	7,788.00	0.35%
6.5		Geomembrana PVC 1.0 mm _ Impermeabilizacion contra bóveda	m2	1,408.0	25.00	35,200.00	1.56%
6.5		Pegamento THF contra bóveda	m2	140.8	140.00	19,712.00	0.88%
7		REVESTIMIENTO FINAL				305,810.34	13.59%
7.1		Geotextil No Tejido 200 gr/m2 / Elipse superior	m2	2,434.8	3.70	9,008.74	0.40%
7.2		Geomembrana PVC 1.0 mm / Elipse superior	m2	2,434.8	25.00	60,869.88	2.70%
7.2		Pegamento THF contra bóveda	m2	243.5	140.00	34,087.13	1.51%
7.3		Construccion de rieles para encofrado	ml	220.0	46.80	10,296.00	0.46%
7.4		Encofrado con carro de Avance	m2	2,434.8	41.20	100,313.56	4.46%
7.6		Concreto para revestimeinto Final f'c 210	m3	493.2	185.00	91,235.04	4.05%
8		CIMENTACION SUPERFICIAL				20,095.27	0.89%
8.1		Concreto en Zapatas Aisladas f'c=210 kg/cm2	m3	21	267.27	5,559.22	0.25%
8.2		Encofrado y desencofrado en Zapatas aisladas normal	m2	32	21.89	700.48	0.03%
8.3		Acerto para Zapatas aisladas	kg	4270	3.24	13,835.58	0.61%

PRESUPUESTO 002 - PRE CRONOGRAMA							
Presupuesto	102005	EST. Av. Bocanegra					
Subpresupuesto	2	ESTRUCTURAS					
Lugar	LIMA - LIMA - Callao						
Item	Código	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.	Porcentaje
9		ELEMENTOS VERTICALES				110,714.95	4.92%
9.1		Concreto E.Verticales	m3	13.0	258.31	3,347.70	0.15%
9.2		Acero en E.Verticales	kg	2648.8	40.36	106,904.15	4.75%
9.3		Encofrado de E.Verticales	m2	86.4	3.24	279.94	0.01%
		Curado de EEV	m2	86.4	2.12	183.17	0.01%
10		ELEMENTOS HORIZONTALES				157,083.33	6.98%
10.1		Concreto E.Horizontales	m3	23.0	258.31	5,951.46	0.26%
10.2		Acero en E.Horizontales	kg	4708.9	31.92	150,308.57	6.68%
10.3		Encofrado de E.Horizontales	m2	153.6	3.24	497.66	0.02%
		Curado de EEH	m2	153.6	2.12	325.63	0.01%
11		LOSAS WAFLE				135,046.07	6.00%
11.1		Losa Wafle h= 35cm	m2	462	266.21	122,989.02	5.46%
11.2		Concreto 210 x m2	m3	300.3	26.55	7,972.97	0.35%
11.3		Encofrado	m2	462	3.24	1,496.88	0.07%
11.4		Curado de losas Wafle	m2	924.0	2.80	2,587.20	0.11%
12		MUROS ANCLADOS				57,091.59	2.54%
12.1		Muros anclados 3mx4m	m2	151.0	378.09	57,091.59	2.54%
13		ESCALERAS				20,295.61	0.90%
13.1		CONCRETO ESCALERA f'c=210 kg/cm2	m3	13.92	266.21	3,705.64	0.16%
13.2		ENCOFRADO Y DESENCOFADO NORMAL EN ESCALERAS	m2	261.52	54.35	14,213.61	0.63%
13.3		ACERO PARA ESCALERA	kg	576.56	3.16	1,821.93	0.08%
13.4		CURADO DE LOSA	m2	261.52	2.12	554.42	0.02%
14		OTROS				5,951.18	0.26%
14.1		TECNOFOR 2"	und	180.00	8.81	1,585.80	0.07%
14.2		Juntas en Revestimiento final	m	334.00	13.07	4,365.38	0.19%
COSTO DIRECTO						2,250,506.00	100.00%

5.2.2 Cronograma de ejecución

El cronograma de ejecución contempla todas las actividades del procedimiento constructivo del Nuevo Método Austríaco, las que fueron descritas en el marco teórico (Véase acápite 2.6). La secuencia de actividades y los tiempos de ejecución provienen del análisis comparativo con la ejecución del método en la construcción de la estación Inés Suarez, Línea 6 del Metro de Santiago de Chile (Geoconsult S.A. 2012). Sin embargo, los rendimientos de maquinaria y los tiempos se ajustan de acuerdo al emplazamiento geológico en la provincia del Callao (Arenas Limo-Arcillosas SM-SP y SM-SW con porcentajes de humedad entre 11 – 26%).

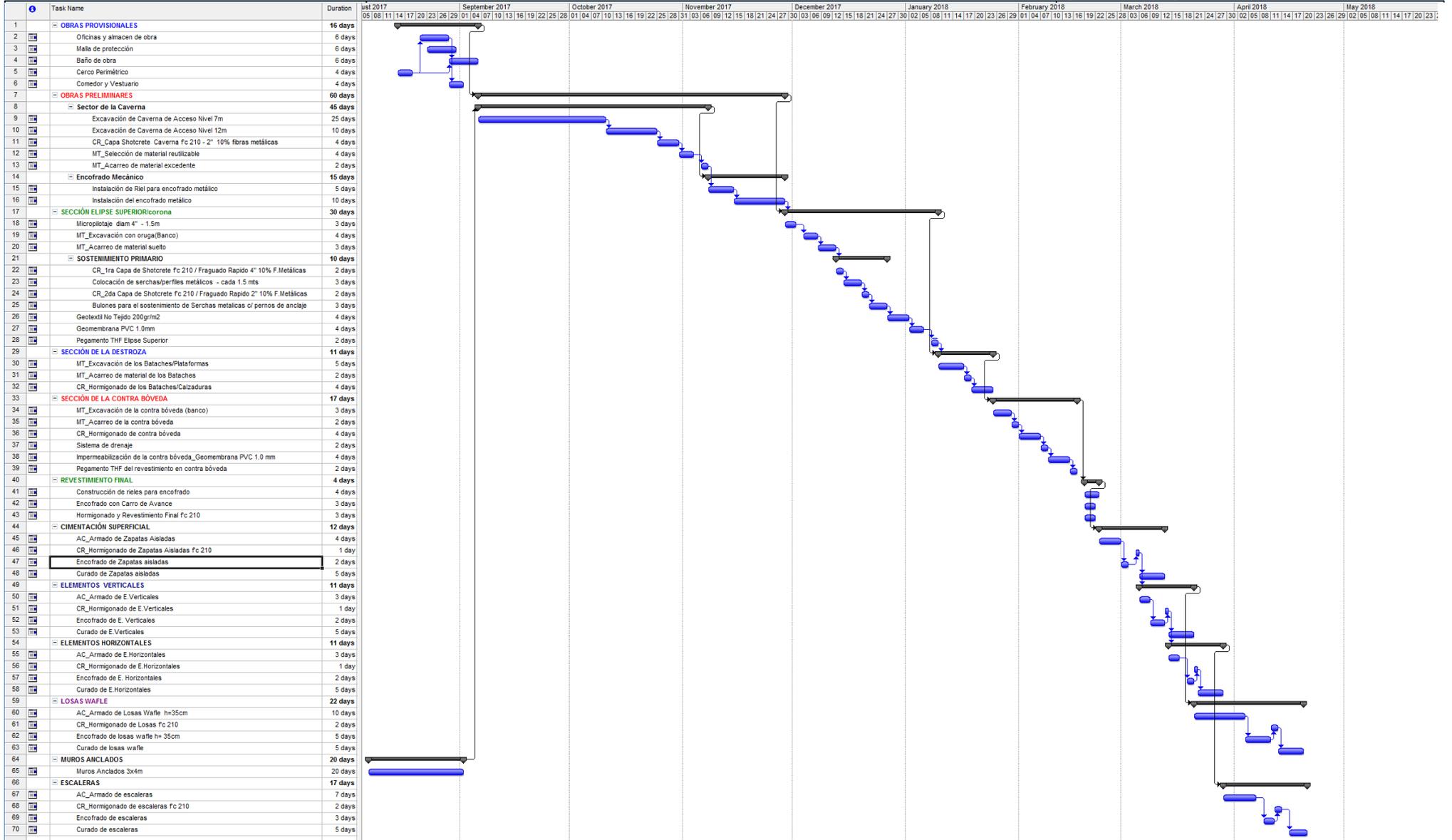
La página siguiente muestra la hoja de cálculo 5.405, en ella se detalla el cronograma de ejecución para la construcción de una estación proyectada con el Nuevo Método Austríaco (NMA). Esta programación se realiza en base al avance limitado que suponen las excavaciones de las secciones de media luna en cada frente de trabajo, así como los tiempos entre la primera y segunda capa de hormigón proyectado o shotcrete cuyos espesores y tiempos están detallados en el marco teórico desarrollado para el NMA (ver capítulo 2).

Tanto en el marco teórico, como en la programación se consideran el emplazamiento sobre suelos blandos y el nivel freático alto (2.5m – 3.2m en la provincia del Callao). Estas variables suponen obras preliminares de impermeabilización dentro del túnel antes de pasar al sostenimiento definitivo. Es necesario mencionar que cada partida de sostenimiento contempla un tiempo definido antes del

encofrado de secciones. Todo ello tiene la finalidad de dar una ventana temporal para relajar los esfuerzos de deformación del suelo y prevenir grietas posteriores en el revestimiento.

Tal como se detalla en el procedimiento constructivo, el Nuevo Método Austríaco requiere de actividades preliminares extendidas para su ejecución es decir, antes de la excavación del túnel propiamente dicho se requiere de la excavación en caverna de una poza con 20 m de diámetro. Esta actividad extiende el cronograma de las obras provisionales hasta en 4 meses.

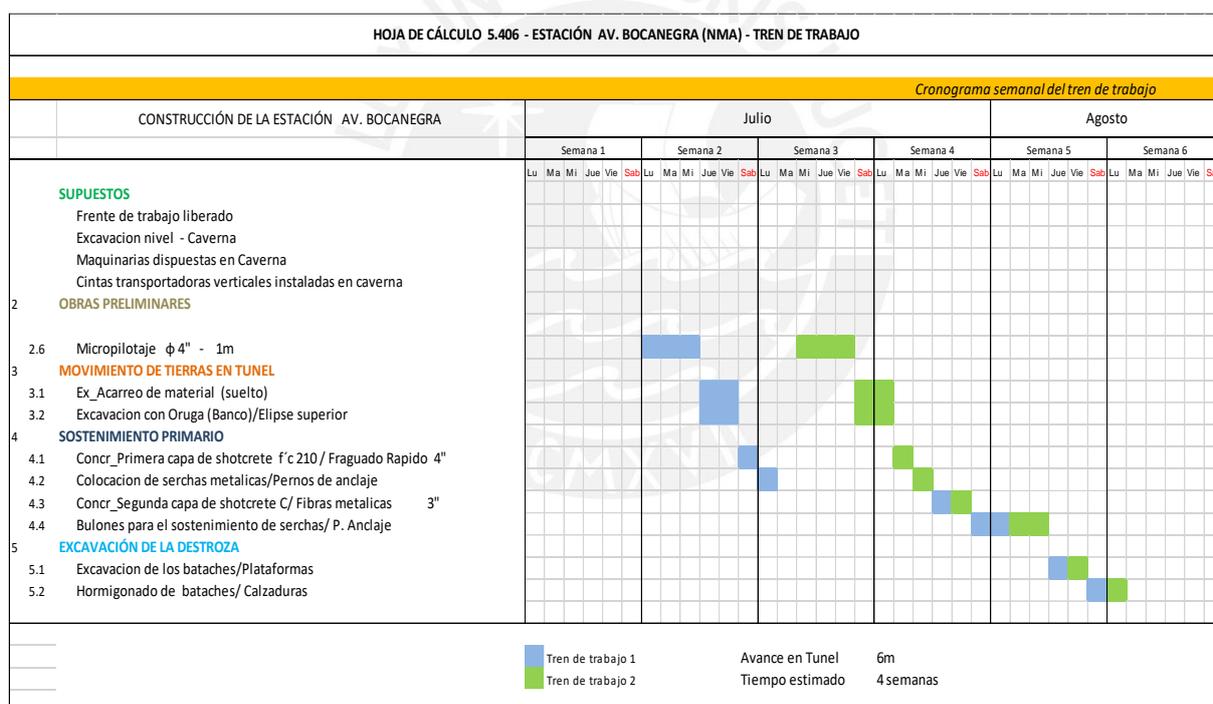




Otro punto a tomar en cuenta son las obras de micropilotaje, las que son necesarias para el sostenimiento primario del túnel. Esta actividad está considerada dentro de las obras preliminares, ya que no implica la excavación de material de ninguna sección del túnel. Se puede observar en el cronograma maestro que esta actividad se extiende hasta el octavo y noveno mes de la programación, debido a que su ejecución está presente en cada sección de túnel que se interviene.

La actividad crítica durante la etapa de excavación del túnel es el movimiento de tierras en la sección de media luna. Esta actividad es crucial, ya que es la predecesora del sostenimiento primario y la posterior excavación de la sección destroza. Es necesario prestar toda la atención y los recursos para que esta actividad esté planificada correctamente y siga un protocolo estándar, el concreto proyectado juega un papel muy importante dentro del sostenimiento primario de la sección corona o elipse superior del túnel.

La longitud de sostenimiento efectivo, se explica como la longitud del túnel que se puede excavar cuando la sección de corona esta sostenida por los micro pilotes. Esta longitud puede estar entre 2 y 4 metros y el tren de trabajo toma en cuenta esta condicionante. La hoja de cálculo 5.406 detalla el tiempo de las actividades que conforman el tren de trabajo.



El tren de trabajo comprende 3 partidas consecutivas. En primer lugar, el movimiento de tierras en la sección de elipse superior del túnel, el sostenimiento primario y la excavación de la destroza. Esta última permite el paso de maquinarias para seguir con la excavación en el frente de trabajo.

Se puede observar que se agrupan 2 trenes de trabajo desde de la partida de segunda capa de shotcrete en adelante. Esta programación permite tener poco más de 5 metros de túnel excavado y sostenido para seguir con el recubrimiento final del túnel, el cual se realiza con un encofrado sobre rieles.

6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE EXCAVACIÓN

El impacto que supone la ejecución sobre un emplazamiento con suelos blandos se materializa en costos adicionales y tiempos de ejecución de cada proyecto. El análisis comparativo se centra en la evaluación de los costos de los materiales en ambos métodos y la estimación de los tiempos de ejecución utilizando distintos procedimientos constructivos.

En el presente capítulo se compara los materiales requeridos en cada método constructivo y los tiempos de ejecución para la construcción de los túneles viales emplazados sobre suelos blandos. Se empleará el diagrama de Pareto en cada método para identificar las partidas que más recursos demandan y los volúmenes globales de materiales requeridos.

El análisis comparativo entre estos dos métodos comprende los costos directos de la ejecución a nivel estructural, la cuantificación de volúmenes de materiales y la estimación de tiempos de ejecución para ambos métodos. Cada uno de estos aspectos se desarrolla tomando en cuenta el procedimiento constructivo descrito en el marco teórico (capítulo 2) y el entorno geológico en el cual se proyectan las estaciones subterráneas (capítulo 3).

6.1 ANÁLISIS COMPARATIVO A TRAVÉS DEL DIAGRAMA DE PARETO

La comparación de los costos directos a nivel estructura en cada estación se realizan en base al análisis de las partidas más importantes durante la ejecución. Una manera de resumir el presupuesto de una obra considerando la importancia de sus partidas es a través del diagrama de Pareto. En este diagrama se ordenan las partidas de acuerdo al costo directo que estas involucran, y luego se agrupa el 20% de las partidas que incluyen el 80% del costo directo total.

HOJA DE CÁLCULO 5.305 - RESUMEN DE LAS PARTIDAS EN LA EJECUCIÓN DEL MÉTODO CUT&COVER

Resumen de Partidas - Est. Oscar R. Benavides

Presupuesto : 0102004
 Proyecto : EST. Oscar R. Benavides
 Lugar : LIMA - LIMA - Callao

CÓDIGO	PARTIDAS	COSTO DIRECTO			
		Real	Acumulado	Relativo Acumulado	Relativo
01	MUROS MILAN	959,334.64	959,334.64	46	45.9%
02	MOVIMIENTO DE TIERRAS	370,009.11	1,329,343.75	64	17.7%
03	LOSAS WAFLE H=0.20	311,593.49	1,640,937.24	79	14.9%
04	REPOSICION DE SUPERFICIE	100,287.72	1,741,224.96	83	4.8%
05	OBRAS PROVISIONALES	1,808.76	1,743,033.72	83	0.1%
06	COLUMNAS	83,796.69	1,826,830.41	87	4.0%
07	ZAPATAS AISLADAS	68,033.59	1,894,864.00	91	3.3%
08	VIGAS PREFABRICADAS	67,424.50	1,962,288.50	94	3.2%
09	OBRAS PRELIMINARES	52,008.82	2,014,297.32	96	2.5%
10	LOSAS MACIZAS H=0.20	35,403.02	2,049,700.34	98	1.7%
11	ESCALERAS	20,295.61	2,069,995.95	99	1.0%
12	CONCRETO SIMPLE	15,033.82	2,085,029.77	100	0.7%
13	OTROS	4,722.60	2,089,752.37	100	0.2%
COSTO DIRECTO			2,089,752.37		

La hoja de cálculo 5.403 detalla el resumen de las partidas para la estación Oscar R. Benavides, proyectada con el método Cut and Cover, seguidamente en la figura 58 podemos observar el diagrama de Pareto con las partidas y los costos directos de cada una.

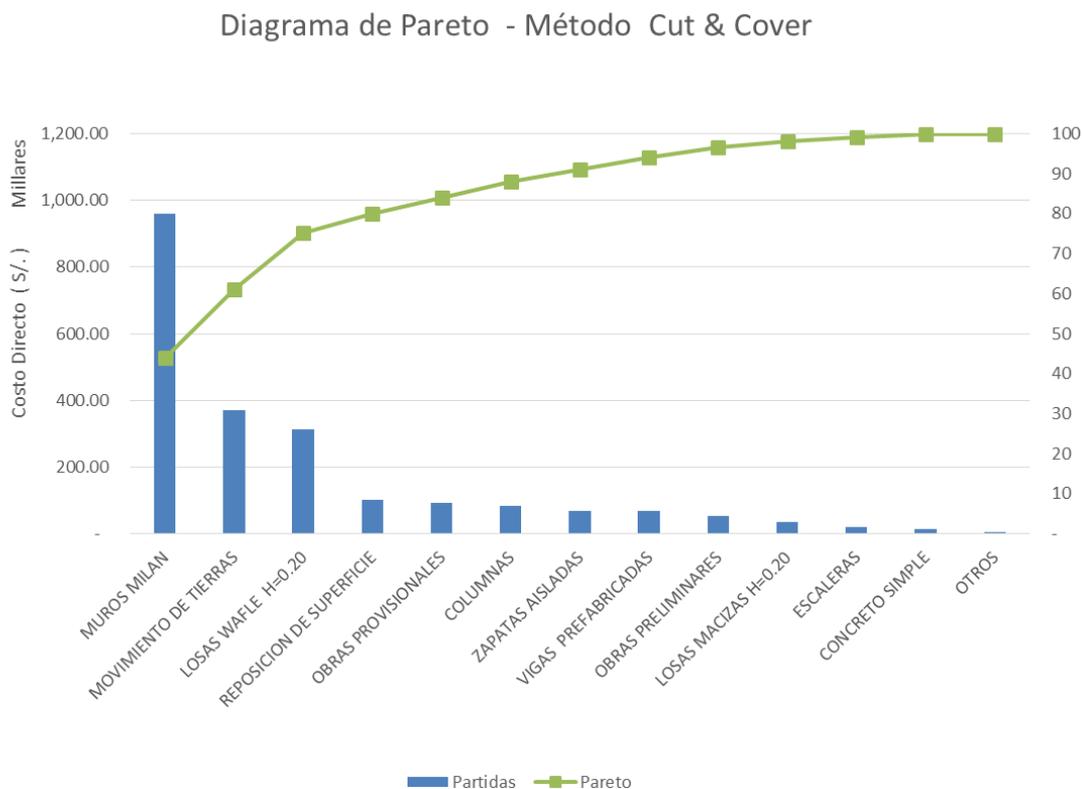


Fig. 58 - Diagrama de Pareto – Cut and Cover (Fuente propia)

De manera similar, se ordenó las partidas involucradas en la ejecución del Nuevo Método Austríaco para su análisis a través del diagrama de Pareto. A continuación, la hoja de cálculo 5.403 y la figura 59 resumen la repercusión del costo individual de las partidas sobre el costo directo total de la construcción de la estación Av. Bocanegra (Nuevo Método Austríaco).

HOJA DE CÁLCULO 5.403 - RESUMEN DE LAS PARTIDAS EN LA EJECUCIÓN DEL NMA					
Resumen de Partidas - Est. Av. Bocanegra					
		Presupuesto : 0102004 Proyecto : EST. Av. Bocanegra Lugar : LIMA - LIMA - Callao			
CÓDIGO	PARTIDAS	COSTO DIIRECTO			Relativo
		Real	Acumulado	Acumulado Relativo	
1	OBRAS PRELIMINARES	639,728	639,728	28.4	28.4%
2	REVESTIMIENTO FINAL	305,810	945,538	42.0	13.6%
3	MOVIMIENTO DE TIERRAS EN TUNEL	246,368	1,191,906	53.0	10.9%
4	SOSTENIMIENTO PRIMARIO	192,851	1,384,757	61.5	8.6%
5	EXCAVACIÓN DE LA CONTRA BOVÉDA	174,313	1,559,070	69.3	7.7%
6	ELEMENTOS HORIZONTALES	157,083	1,716,153	76.3	7.0%
7	LOSAS WAFLE	135,046	1,851,199	82.3	6.0%
8	ELEMENTOS VERTICALES	110,715	1,961,914	87.2	4.9%
9	EXCAVACIÓN DE LA DESTROZA	93,894	2,055,808	91.3	4.2%
10	OBRAS PROVISIONALES	91,264	2,147,072	95.4	4.1%
11	MUROS ANCLADOS	57,092	2,204,164	97.9	2.5%
12	ESCALERAS	20,296	2,224,460	98.8	0.9%
13	CIMENTACION SUPERFICIAL	20,095	2,244,555	99.7	0.9%
14	OTROS	5,951	2,250,506	100.0	0.3%
COSTO DIIRECTO		2,250,506.00			

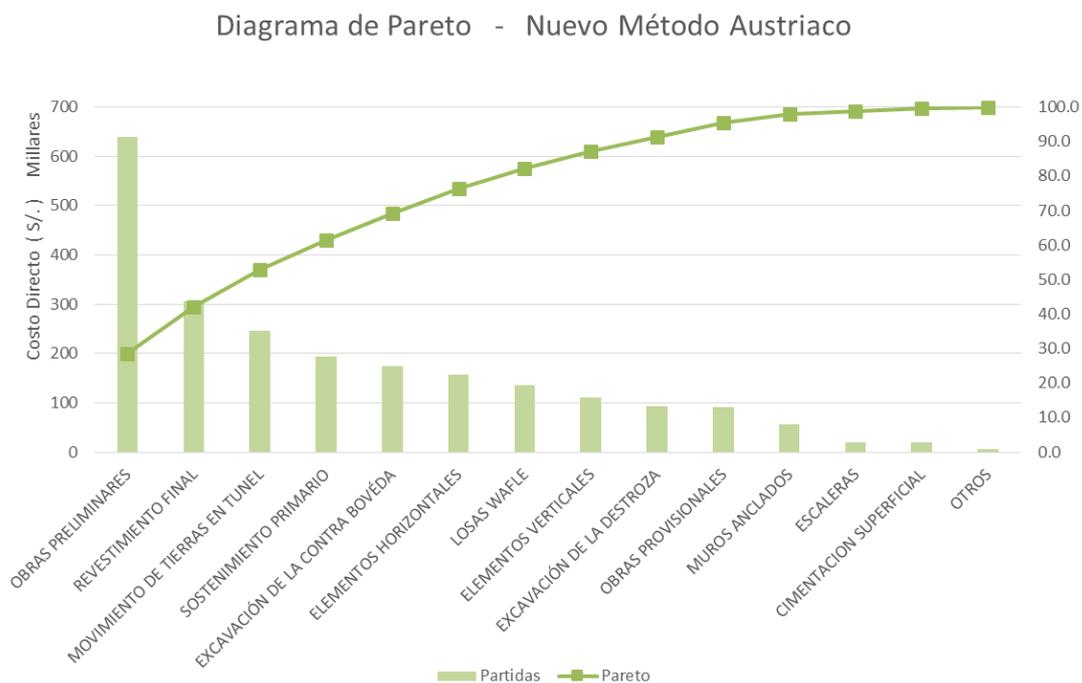


Fig. 59 - Diagrama de Pareto – Cut and Cover (Fuente propia)

Una vez realizado el diagrama de Pareto para el presupuesto del costo directo de estructuras en ambos métodos podemos observar la importancia de cada una de las partidas que concentran el 80% del costo directo. Estas partidas en algunos casos son similares y en otros distintos para ambos métodos.

La aplicación del método Cut and Cover para la construcción de una estación subterránea tiene entre sus partidas más importantes: la ejecución de los muros Milán, el movimiento de tierras y la reposición de la superficie. Está claro que este método por ser de ejecución a cielo abierto supone la reposición de la superficie. Si bien esto no agrega valor al túnel, es completamente necesario. En la figura 60 podemos observar que la partida de los Muros Milán es un 44.0% (959' 334.00 Nuevos soles) del costo directo total. Entre otras partidas importantes tenemos que la reposición de la superficie tiene un costo directo del 4.6 % (100 278.00 Nuevos Soles) del total.

En lo que respecta a la partida de obras provisionales se puede afirmar que son el 4.2% (91' 264.00 Nuevos Soles) del total. Esto se debe a que antes de iniciar la excavación de los muros Milán no es necesario realizar trabajos previos que demanden gran cantidad de recursos, ya que como se explica en el marco teórico este método es una intervención a cielo abierto.

La partida de losas tipo Waffle representa el 14.3% (311 593.00 Nuevos Soles) del total. El uso de este tipo de losas es común cuando se emplea el método Cut and Cover y cubre casi el total del área de esta, ya que se utiliza para dividir los niveles de sótano y para la reposición de la superficie.

Método Cut & Cover - 80% Costo Directo (S./)

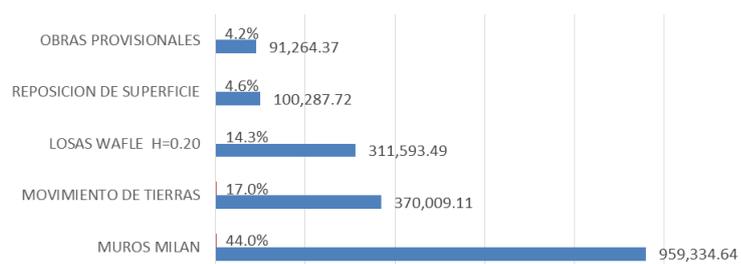


Fig. 60 - Partidas mayores – Cut and Cover (Fuene propia)

Finalmente, la partida de Movimiento de Tierras conforma el 17.0% (370 009.00 Nuevos Soles) del total, ya que el Método Cut and Cover no puede optimizar los volúmenes de material por tener una geometría rígida desde su concepción. En consecuencia, el espacio cuadrado entre muro y muro tiene que ser totalmente vaciado de material para poder continuar la ejecución del túnel y no necesariamente una sección rectangular es la más óptima para el tránsito de un sistema de trenes subterráneo.

La ejecución del Nuevo método Austríaco es una intervención subterránea, en ese sentido es probable que antes de iniciar las labores de excavación en el túnel, se tengan que realizar trabajos previos. Si bien se puede ahorrar costos, ya que no se repondrá la superficie como en el método Cut and Cover, hay otras partidas que elevan los costos directos totales. A continuación, se detallan las partidas más importantes de análisis de Pareto (Gráfico 5.5.4) las cuales conforman el 80% del costo total directo.

La partida de las losas Wafle representa un 6.0% (135 046.00 Nuevo Soles) del total, referente al costo es menor en un 50% al método Cut and Cover. Esto se debe a que en el NMA no se diferencian los niveles de sótanos dentro de la estación, pues está conformada por una única bóveda de luz libre mayor a 10 m además que, en el NMA ya no se necesita reponer la superficie con losas Wafle, pues es un método de ejecución subterránea.

La partida de excavación de la contra bóveda es independiente de la excavación de sección de media luna, porque su avance supone un patrón conformado por plataformas como se explica en el marco teórico desarrollado para el NMA (ver capítulo 2). Esta partida de excavación de contra bóveda representa un 7.7% (174 083.00 Nuevos Soles) del total del costo directo.

El sostenimiento primario representa un 8.6% (192 851.00 Nuevos Soles) del costo directo total, esta partida incluye la primera capa de hormigón proyectado o shotcrete, la cual cubre un 80% de la elipse superior o sección de media luna. En caso de intervenir en un suelo blando se requiere agregar fibras de acero al shotcrete, esto también eleva los costos de esta partida específicamente. Los detalles están en el presupuesto del túnel proyectado con el NMA.

La sección transversal del túnel tiene un área efectiva de 113 m² la cual continúa en toda la extensión del túnel (116 m). Particularmente, la sección de media luna conformada por una semi elipse de radios R1=8m y R2=6m, es una geometría simple que permite cuantificar en banco el movimiento de tierras en el túnel. Esta partida representa un 10.9% (246' 368.00 Nuevos Soles) del costo total directo, tal como se puede observar en la figura 61 deducido del análisis de Pareto.

Nuevo Método Austriaco - 80% Costo Directo (S./)

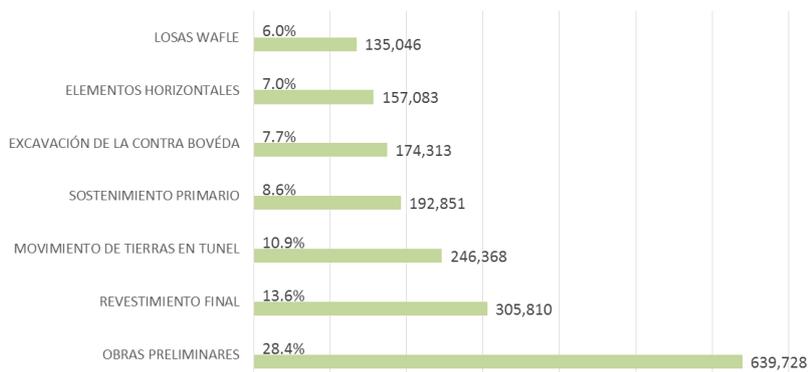


Fig. 61 - Partidas mayores – NMA (Fuente propia)

El revestimiento final del túnel supone un 13.6% (305 810.00 Nuevos Soles) del total de costo directo. En esta partida, está presente el reforzamiento de la sección del túnel con mallas electro soldadas y una segunda capa de hormigón proyectado o shotcrete, sub partidas que elevan el costo de la ejecución del NMA para la construcción de una estación subterránea.

La partida de obras preliminares es la mayor de todas con un 28.4% (639 728.00 Nuevos Soles) del costo directo total. Esta partida tiene dos particularidades que la diferencian de las obras preliminares del método Cut and Cover.

En primer lugar, los trabajos preliminares en la ejecución del NMA incluyen la construcción de una bóveda o pique de un diámetro de 20 a 25 m para poder iniciar la excavación del túnel propiamente dicho. En segundo lugar, es necesario realizar trabajos de micropilotaje en la sección de la corona del túnel antes de su excavación. Este presostenimiento tiene como finalidad proteger los equipos y al personal cuando se excave la sección de media luna.

Los micro pilotes utilizados en esta etapa preliminar son de diámetro 10cm y tienen una longitud de 4 metros. Actualmente, las empresas que prestan servicios de pilotaje localizado cobran por metro perforado. Por ello, para este caso se presupuesta un costo directo de 125.6 nuevos soles por metro de micro pilote perforado.

6.2 ANÁLISIS COMPARATIVO A TRAVÉS DE MATERIALES

Los volúmenes de material empleado en ambos métodos también hacen una gran diferencia en el costo directo final. En este caso, se analizó los materiales que conforman la partida de concreto armado, ya sea para elementos estructurales verticales u horizontales, muros Milán y volúmenes en Shotcrete, etc.

La cuantificación del concreto y el acero nos brinda una idea general de los requerimientos en cada método constructivo. Estos volúmenes ocasionan juntos, más del 20% del costo directo total de la construcción. A continuación, se presentan las hojas de cálculo (5.306 y 5.404) segregadas para estos dos materiales en cada uno de los métodos constructivos.

HOJA DE CÁLCULO 5.306 - PRECIOS UNITARIOS DE MATERIALES - ESTACIÓN CUT&COVER

Análisis de precios unitarios por materiales

Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.	Porcentaje
ACERO PARA COLUMNAS	kg	14103.60	3.24	45695.66	2.2%
ACERO PARA ESCALERA	kg	576.56	3.16	1821.93	0.1%
ACERO PARA LOSA WAFLE	kg	601.25	3.24	1948.05	0.1%
ACERO PARA MUROS MILAN	kg	157700.00	3.24	510948.00	24.5%
ACERO PARA VIGAS	kg	12902.40	3.24	41803.78	2.0%
ACERO PARA VIGAS	kg	2447.05	3.24	7928.44	0.4%
ACERO PARA ZAPATAS AISLADAS	kg	12950.00	3.24	41958.00	2.0%
		201280.86		652103.86	31.2%
CONCRETO CIMIENTOS CORRIDOS MEZCLA 210kg/cm2	m3	40.00	252.36	10094.40	0.5%
CONCRETO COLUMNAS f'c=210 kg/cm2	m3	69.00	258.31	17823.39	0.9%
CONCRETO ESCALERA f'c=210 kg/cm2	m3	13.92	266.21	3705.64	0.2%
CONCRETO LOSA MACIZA f'c=210 kg/cm2	m3	52.30	266.21	13922.78	0.7%
CONCRETO LOSA WAFLE f'c=210 kg/cm2	m3	925.00	266.21	246244.25	11.8%
CONCRETO MUROS MILAN _ 210kg/cm2	m3	1660.00	257.98	428246.80	20.5%
CONCRETO VIGAS f'c=210 kg/cm2	m3	72.00	258.31	18598.32	0.9%
CONCRETO ZAPATAS AISLADAS f'c=210 kg/cm2	m3	63.00	267.27	16838.01	0.8%
		2895.22		755473.60	36%

COSTO DIRECTO

2089752.37

HOJA DE CÁLCULO 5.404 - PRECIOS UNITARIOS DE MATERIALES - ESTACIÓN NMA

Análisis de precios unitarios por materiales

Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.	Porcentaje
Acero en E.Horizontales	kg	4708.92	31.92	150308.57	6.7%
Acero en E.Verticales	kg	2648.76	40.36	106904.15	4.8%
Acero para bataches/ Calzaduras	kg	10162.00	3.24	32924.88	1.5%
Acero para caverna	kg	28264.00	3.24	91575.36	4.1%
Acero para contra bóveda	kg	20325.00	3.24	65853.00	2.9%
ACERO PARA ESCALERA	kg	576.56	3.16	1821.93	0.1%
Acero para Zapatas aisladas	kg	4270.24	3.24	13835.58	0.6%
		70955.48		463223.47	20.6%
Concr_Primer capa de shotcrete f'c 210 / Fraguado Rapido 4"	m3	247.38	162.00	40074.78	1.8%
Concr_Segunda capa de shotcrete C/ Fibras metalicas 3"	m3	185.53	185.00	34323.31	1.5%
Concreto E.Horizontales	m3	23.04	258.31	5951.46	0.3%
Concreto E.Verticales	m3	12.96	258.31	3347.70	0.1%
Concreto 210 x m2	m3	300.30	26.55	7972.97	0.4%
Concreto en Zapatas Aisladas f'c=210 kg/cm2	m3	20.80	267.27	5559.22	0.2%
CONCRETO ESCALERA f'c=210 kg/cm2	m3	13.92	266.21	3705.64	0.2%
Concreto para bataches/ Calzaduras	m3	49.50	252.36	12491.82	0.6%
Concreto para Caverna	m3	188.50	252.36	47568.85	2.1%
Concreto para revestimiento Final f'c 210	m3	493.16	185.00	91235.04	4.1%
Concreto para contra bóveda	m3	99.00	252.36	24983.64	1.1%
		1634.08		277214.42	12.3%

COSTO DIRECTO

2250506.003

La ejecución del método Cut and Cover requiere volúmenes de acero y concreto mayores a los presupuestados con el método alternativo NMA. En este caso, los Muros Milán elevan considerablemente el requerimiento de concreto (2895 m³) que supone el 36% del costo directo total. De manera análoga la partida de acero es la más representativa con un 31.2% del costo directo total de la ejecución y el volumen de acero requerido es de 201.3 toneladas, aproximadamente.

En el caso de la ejecución con el NMA, se tiene que el material acero representa un 20.6% del costo directo total y el volumen presupuestado de acero es de 70.95 toneladas. La partida de concreto es el 12.3% del costo directo total y supone un volumen de 1634 m³ de concreto, con un considerable volumen de concreto proyectado de 3.3% del costo directo total. La conformación de la contra bóveda y la sección de destroza también elevan los volúmenes de concreto requerido.

En contraste, el método Cut and Cover supone los mayores volúmenes de acero y concreto para su ejecución, lo cual, aparentemente, lo ubica como el método más costoso. Sin embargo, el Nuevo Método Austriaco es realmente el más costoso. Es decir, como quedó demostrado anteriormente, los trabajos de micropilotaje y la excavación preliminar de la bóveda de diámetro de 20m elevan considerablemente la partida de los trabajos preliminares.

6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN Y MAQUINARIA

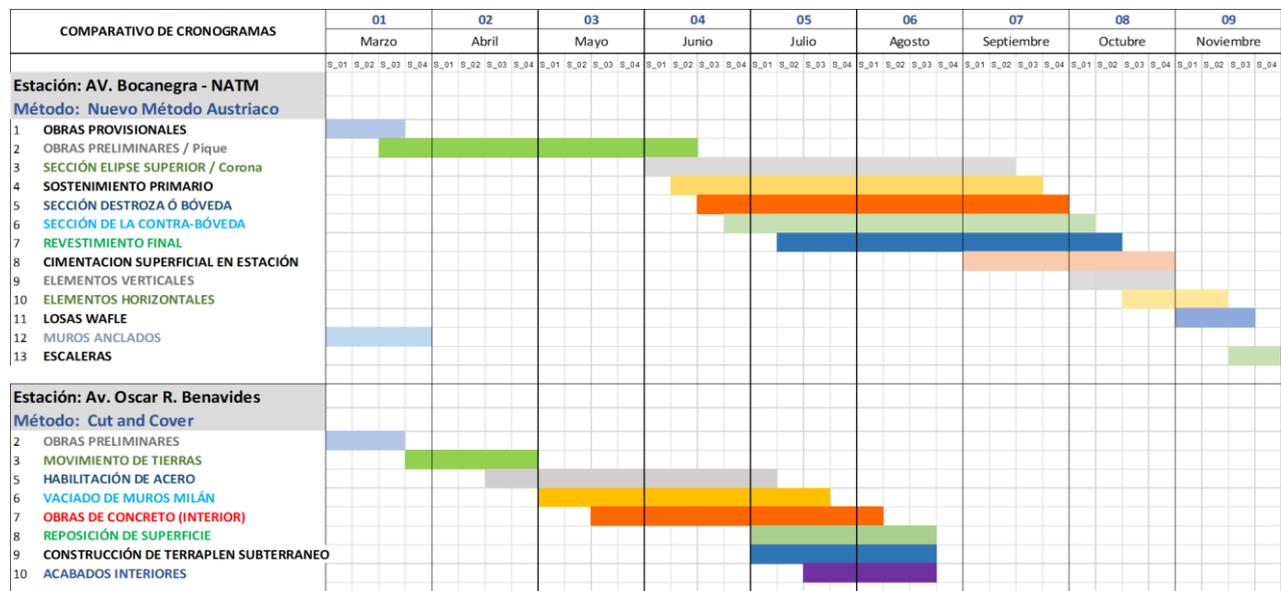
La comparación de los tiempos de ejecución en cada uno de los métodos constructivos se concentra en el análisis de los trenes de trabajo y sus principales actividades, ya que estas conforman la ruta crítica del proyecto y su atraso tiene gran repercusión en el plazo de entrega.

En el capítulo 5 se muestra el detalle de la programación de los trenes de trabajo para cada método constructivo. En cada una de estas programaciones se tiene supuestos, los cuales implican un estado de frente liberado y maquinaria disponible para proceder con el tren de trabajo propiamente dicho.

A continuación, la figura 63 muestra un resumen de ambos cronogramas de ejecución:

- Estación Av. Bocanegra (Nuevo Método Austriaco).
- Estación Av. Oscar R. Benavides (Método Cut and Cover).

De manera general concluimos que la estación proyectada con el Nuevo Método Austriaco lleva en total 9 meses. (3 meses de obras provisionales y 6 de excavación del túnel propiamente dicho). Por otro lado, la estación proyectada con el Método cut and cover toma en total 6 meses (1.5 meses de obras preliminares y 4.5 de obras de movimientos de tierra y reposición de superficie), siendo este último más rápido.



Se puede señalar que a diferencia de los 1.5 meses que toman los trabajos preliminares con el método Cut and Cover (excavación a cielo abierto), la ejecución con el Nuevo Método Austríaco contempla trabajos preliminares que se extienden hasta los 6 meses de iniciado el proyecto (excavación del pique o galería de acceso).

En el siguiente Tabla 22 se muestra el avance en excavación sostenida para cada método. La excavación sostenida implica secciones de túnel con paredes estabilizadas. En el caso del método Cut and Cover, la ejecución de los Muros Milán permite un avance cada 5 metros (2 pantallas paralelas) en un tiempo de 2 semanas, sin considerar el acarreo del material y la reposición de la superficie.

Tabla 22 - Resumen del avance por metro de túnel sostenido

Método constructivo	AVANCE	TIEMPO
Método Cut and Cover	5 m	2 semanas
Nuevo Método Austríaco	6 m	4 semanas

El tren de trabajo en el Nuevo Método Austríaco contempla un avance de 6 metros de túnel sostenido en 4 semanas, y deja el frente liberado para el sostenimiento definitivo con el encofrado sobre riel y posterior hormigonado. Este avance permite continuar las labores de sostenimiento primario en los metros siguientes del túnel (Micropilotaje, excavación y acarreo de material).

A diferencia del método Cut and Cover, el tren de trabajo en el Nuevo Método Austríaco implica, además, el acarreo y transporte del material de las secciones del túnel, partida que está programada después de la construcción de los muros Milán (4 meses después). Sin embargo, los tiempos de ejecución para las actividades del Nuevo Método Austríaco son mayores. Asimismo, representa una ejecución con altos índices de riesgos para los trabajadores.

La etapa de construcción con el método cut and cover se divide en 2 fases, una fase de trabajos preliminares la cual contempla la ejecución de demolición de carpeta asfáltica, y posteriormente la excavación y construcción de los Muros Milán, posteriormente se trabaja la reposición de la superficie. En caso del Nuevo Método Austríaco, los trabajos preliminares conllevan la ejecución de un pique o galería de acceso para llegar al nivel de riel o fondo de túnel, la excavación de la estación comienza con los trabajos de micropilotaje en la sección de corona y el sostenimiento primario y final en cada sección.

La tabla 23 detalla los tiempos de ejecución de la estructura para ambos métodos, diferenciando para cada caso las dos fases antes descritas.

Tabla 23 – Resumen de los tiempos de ejecución

Método constructivo	Obras preliminares	Obras de excavación de túnel
Método Cut and Cover	1.5 meses	4.5 meses
Nuevo Método Austríaco	3 meses	6 meses

Las obras preliminares y posteriores son trabajos no contributivos, pues no agregan valor al túnel propiamente dicho. En el caso del método Cut and Cover, las obras preliminares tienen una programación de 1.5 mes y las obras posteriores demandan 4.5 meses más. En resumen, la construcción de una estación a desnivel con el método Cut and Cover está proyectada en 6 meses de ejecución, cabe resaltar que las obras posteriores contemplan la reposición de la superficie.

En contraste con el método Cut and Cover, el método de intervención subterránea conocido como Nuevo Método Austríaco demanda más tiempo en obras preliminares (3 meses vs. 1.5 meses), ya que se necesita construir un pozo tipo caverna para poder iniciar las obras de micropilotaje en la sección de la corona del túnel, a diferencia de los trabajos de demolición de carpeta asfáltica considerados con el Cut and cover.

Finalmente, la construcción de una estación proyectada con el método cut an cover (cielo abierto) lleva 6 meses en total (preliminares mas excavación) y una ejecución con el Nuevo Método Austríaco toma en total 9 meses incluyendo los trabajos preliminares.

La extensión de ambos cronogramas impacta también en el cálculo de los gastos generales y de maquinarias, para el Nuevo Método Austríaco se tiene 3 meses “adicionales” de planilla y costos relacionados a maquinarias especializadas como son: equipo de micropilotaje, equipos y bombas para la aplicación de hormigón proyectado para el sostenimiento primario y el tren con el encofrado metálico para la cobertura final de las secciones NATM. Los detalles de las estimaciones se encuentran en el anexo B4 (Comparativo de gastos generales y maquinarias)

A continuación, se presenta un resumen general con el costo total de las obras civiles para ambos métodos, es necesario mencionar que no se incluyen: el material de rodadura, sistema eléctrico y mecánico de las estaciones, ni ascensores o elevadores y otros costos indirectos como expropiaciones y/o programas sociales de concientización.

RESUMEN DE PRESUPUESTO - CUT AND COVER			
EST. OSCAR R. BENAVIDES (EX COLONIAL)			
COSTO DIRECTO	S/	2,179,208	59%
GASTOS GENERALES	S/	731,725	20%
MAQUINARIA	S/	776,000	21%
	COSTO DE OBRA	S/ 3,686,933	
CONTINGENCIAS	S/	147,477	4%
OTROS	S/	92,173	2.5%
TOTAL	S/	3,926,583	

RESUMEN DE PRESUPUESTO - NATM			
EST. BOCANEGRA			
COSTO DIRECTO	S/	2,250,506	48%
GASTOS GENERALES	S/	1,097,587	24%
MAQUINARIA	S/	1,308,000	28%
	COSTO DE OBRA	S/ 4,656,093	
CONTINGENCIAS	S/	186,244	4%
OTROS	S/	116,402	2.5%
TOTAL	S/	4,958,739	

En primer lugar, observamos que el costo directo de los materiales (obra civil) del método NATM es mayor al costo directo del método cut and cover (2,17 millones de soles vs. 2.25 millones). Los gastos generales también son mayores en la ejecución proyectada con el Nuevo Método Austríaco, debido a la extensión del cronograma (6 meses vs. 9 meses para el NATM.) además los GG representan el 24% del costo total a diferencia del método cut and cover (20% del costo total).

Además, se incluyen contingencias y otros gastos por lo general calculados en base a ejecuciones de obras de infraestructura vial del entorno local, 4% como contingencias y 2.5% como otros y/o adicionales al presupuesto global de obras civiles (entiéndase solo infraestructura).

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El método Cut and Cover es una ejecución a **cielo abierto** y supone la reposición de la superficie para el tránsito vehicular; ello no agrega valor al túnel-propiamente dicho-pero sí a los trabajos de demolición de carpeta asfáltica, ya que son necesarios para la construcción de los Muros Milán. Esta partida adicional puede alcanzar alrededor de un **5%** del costo directo en la construcción del túnel vial.
- La construcción de **Muros Milán** en un emplazamiento con suelo blando requiere de la estabilización del suelo durante el proceso de excavación y vaciado de concreto. Esto se logra utilizando lodo bentonítico mientras la cuchara tipo almeja va ejecutando la excavación de suelo. Esta partida de estabilización representa entre **2 y 3%** del costo directo dependiendo la estratigrafía local.
- El método Cut and Cover demanda mayores volúmenes de acero y concreto en comparación con el Nuevo Método Austríaco; sin embargo, este último resulta siendo el más costoso, pues incluye trabajos preliminares de micropilotaje antes de la excavación de la sección del túnel.
- La ruta crítica en el caso de una ejecución con el método Cut and Cover está delimitada por la excavación con la maquinaria conocida como *almeja hidráulica*, la cual se encarga de excavar las zanjas para el hormigonado de los Muros Milán. En consecuencia, el cronograma general se arma en base al avance de esta maquinaria. Por lo general, en un frente de ataque se tiene dos almejas hidráulicas trabajando en paralelo.
- La aplicación de la filosofía look ahead, específicamente la programación del avance con el **tren de trabajo** en el método Cut and Cover está condicionado por los tiempos de ejecución de los **muros Milán**, parte importante en la ruta crítica. Este método tiene un avance de 10 metros lineales en 2 semanas. En cambio, una intervención subterránea con el Nuevo Método Austríaco presenta un rendimiento de 6 metros de túnel **sostenido** en 4 semanas, dejando claro la rapidez del primer método.
- El **uso de maquinaria** en el método cut and cover, representa el **21%** del **costo total** de obra, mientras que en el caso del nuevo método austriaco el uso de maquinaria es el **28%**. Esto se debe a la complejidad del NATM, al ser un método subterráneo requiere **equipos especializados** para ese tipo de intervención.
- La ejecución del Nuevo Método Austríaco no contempla costos de **reposición de superficie** a diferencia del método Cut and Cover. Por esta razón, la **ruta crítica del NATM** está compuesta solo por partidas de valor agregado en infraestructura y sin tiempos muertos. Sin embargo, las obras preliminares toman 13 semanas a diferencia de las 8 semanas en el caso del método cut and cover.
- El NATM incluye la construcción de una **bóveda tipo caverna** con un diámetro de 20 m aproximadamente y una profundidad tal que coincida con el fondo de contra bóveda de la sección del túnel. Esta estructura preliminar es necesaria para el inicio de los trabajos de excavación de la sección de media luna del túnel propiamente dicho. Su construcción representa un **12.9 %** del costo total de obra.

- El avance de las secciones de media luna depende de los fenómenos de convergencia y subsidencia, los cuales tienen límites permisibles de 5 a 12 mm para túneles viales. Este asentamiento puede ser mayor en emplazamientos con suelos blandos. Por ello, es necesario cubrir las secciones del túnel con mallas electro soldadas antes de cada capa de hormigón proyectado o shotcrete. Esto se hace con la finalidad de otorgar una flexibilidad a la estructura en conjunto y tener controlados los fenómenos antes mencionados.
- La partida de recubrimiento final representa el 15% del costo directo total en la ejecución del NATM. Esta incluye, además, de la segunda capa de hormigón proyectado, capas de **impermeabilización** con geomembranaPVC y **plataformas de drenaje** con geotextil. Es la geometría del túnel la que exige este proceso, ya que la ser elíptica, las infiltraciones tienen velocidades mucho mayores que en el caso del método Cutand Cover.
- Los gastos generales en el caso del NATM son mayores en **365K** de los GG del método Cutand cover, básicamente por la extensión del cronograma (NATM: 9 meses y Cut and cover: 6 meses).
- Los trabajos preliminares en una intervención con el Nuevo Método Austríaco se extienden entre 6 y 10 meses después del inicio de las obras. Las partidas más importantes dentro de los trabajos preliminares son las siguientes: Excavación del pozo tipo caverna o pique circular y los trabajos de micropilotaje, necesarios para el sostenimiento inicial de la sección del túnel. En el caso específico de una intervención sobre suelos blandos es necesario considerar los anillos de sostenimiento cada 2 metros excavados (normamente cada 5 metros de profundidad excavados en perfiles de grava con matriz arenosa).
- El método Cutand Coveres más eficaz en términos de plazo y costo total (3.9MM vs. 4.9MM), siendo ideal para estaciones intermedias, por otra parte, el NATM representa la alternativa ideal en intervenciones donde el emplazamiento urbano requiere continuar con las actividades en la superficie. Su avance, a diferencia del método Cutand Cover (**longitud de muros Milán**), está condicionado por la “**longitud efectiva de sostenimiento**” de los micro pilotes en la sección de corona del túnel.
- El Nuevo Método Austríaco representa la alternativa ideal en intervenciones donde el emplazamiento urbano requiere continuar con las actividades en la superficie. Su avance, a diferencia del método Cut and Cover, está condicionado por la “longitud efectiva de sostenimiento” de los micropilotes en la sección de corona del túnel y requiere un estricto control de desplazamientos tanto dentro del túnel como asentamientos en la superficie.
- La provincia constitucional del Callao presenta una estratigrafía con presencia de suelos blandos y nivel freático superficial (4 a 5 m). Sin embargo, existen otros emplazamientos urbanos como Chorrillos (depósitos eólicos y arenas sueltas) ó villa el salvador (arenas arcillosas y sueltas) para los cuales es necesario un análisis detallado de la aplicación de métodos de excavación subteraneos, de acuerdo a las exigencias y limitaciones que supone cada emplazamiento geológico.

8.1 FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

MELIS MAYNAR, Manuel. (1998) *Construcción de los túneles del Metro de Madrid en Suelos Blandos. (pag. 222) E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Universidad de La Coruña, España.

ALONZO PÉREZ, Eduardo. (2005) *Las Catástrofes y el progreso de la Geotecnia, Real Academia de Ingeniería. (pág. 11), España*.

LÓPEZ JIMENO. (2011) *Manual de Túneles y Obras Subterráneas. (pág. 519)*.

GUTIÉRREZ ORTIZ, Luis. (2011) *Procedimiento Constructivo de la estación 20 noviembre. Línea 12 del metro de Ciudad de México. (Facultad de Ingeniería - UNAM)*.

PRIEGO DE LOS SANTOS, Enrique. (2010) *Túneles y tuneladoras: nociones generales y topografía para su guiado*.

REIG RAMOS, María Isabel (2010) *Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados*. Escuela UPM. E.T.S. DE ING. DE CAMINOS CANALES Y Puertos. Universidad de La Coruña, España.

SANTOYO, BERMUDEZ ET AL. (2013) *Evolución de la construcción de túneles urbanos*.

GONZÁLEZ VALDERRAMA, Christian. (2016) *Estudio de perfectibilidad para la construcción de túneles de metro*. Repositorio Universidad de Chile.

8.2 THIRD MEETING TUNNEL & MINING LIMA-PERÚ

SALAZAR BONILLA, Hector. (2011) *Condiciones especiales para el Diseño y construcción del metro de Bogotá. 3th Tunnel & Mining, Lima-Perú*.

VELASCO TRIVIÑO, Eduardo. (2013) *Proyecto y Construcción de la estación Inés Suarez Línea 6 Metro de Santiago de Chile. 3th Tunnel & Mining, Lima-Perú*.

GERENCIA CORPORATIVA METRO SANTIAGO, (2015) *Encuentro internacional de metros Lima. 3th Tunnel & Mining, Lima-Perú*.

8.3 FUENTES DE INFORMACIÓN OFICIALES

INGEMMET, IGN. (2011) *Mapa Geológico, oficina de acondicionamiento territorial– Gobierno Regional del Callao. (Cuadrante 18S)*

INDECI. (2011) *Mapas de Microzonificación Sísmica en el Centro Histórico de Lima y Provincia del Callao (Cercado de Lima y Rímac), Villa María del Triunfo y Callao. (INDECI, CISMID, et al.)*

ONER. (2011) *Mapa de clasificación de suelos, oficina de acondicionamiento territorial-Gobierno Regional del Callao. (ONERN, MZEE, Cuadrante 18S)*

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. (2011) *Sistema vial Metropolitano de Lima y Callao, (O-341 ML)*.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES. (2012) *Red de estaciones intermedias de la Línea 6 del metro de Santiago de Chile*, Ministerio de transporte de Chile.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. (2013) *Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial*, Capítulo de Clasificación de vías, Perú.

SENSICO. (2015) *Norma Técnica Peruana E.050 de suelos y comentaciones*, (Cap. 6, Art. 29.2)

SENSICO. (2016) *Norma Técnica Peruana E.030 de diseño sismo resistente*. (Cap. 2.2.1)

8.4 REVISTAS DEL SECTOR CONSTRUCCIÓN, PERÚ

CONSTRUCTIVO. (2015) línea 6 metro Santiago de Chile. *Revista Perú construye*. Lima, nro. 038, Diciembre 2015, pp. 34.

CAPECO. (2018) Boletín técnico Índice de precios y materiales. *Revista Construcción e Industria*. Lima, nro. 340, Marzo 2018, pp. 42-49.

CAPECO. (2018) Boletín técnico Índice de precios y materiales. *Revista Construcción e Industria*. Lima, nro. 345, Agosto 2018, pp 36-40.

8.5 RECURSOS ELECTRÓNICOS

AZVI VOXEL STUDIOS. (2010) Tramo Embalse Contreras – Villargordo del Cabriel, Valencia-España. Recuperado de https://www.grupo-sanjose.com/p_TRAMO-EMBALSE-DE-CONTRERAS

PROINVERSIÓN. (2012) Estudio de preinversión a nivel de perfil Línea 2 del metro de Lima y Callao. Recuperado de https://www.proyectosapp.pe/RepositorioAPS/LINEA2_TREN_ESTUDIOS

PROINVERSIÓN, COSAPI. (2013) Concesión de la Línea 2 y Ramal Faucett-Gambeta Línea 4. Recuperado de <https://www.proyectosapp.pe/modulos/JER/Linea2>

PIRESA, (2015) Catalogo electrónico / Traslape micropilotes. Madrid- España, Recuperado de <https://www.piresa.es>

Anexo A

Anexo A - CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTACIONES

En este anexo, se analizan otros aspectos de las estaciones como el tipo de infraestructura de las estaciones, la demanda de usuarios proyectada y la clasificación de las vías de acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Se presentan los aspectos más importantes referente a la infraestructura de las estaciones proyectadas con los métodos Cut and Cover y Nuevo Método Austríaco.

El estudio de estos aspectos tiene como finalidad la elección de dos estaciones representativas para efectos del análisis comparativo con los métodos de excavación propuestos en el marco teórico de la presente tesis.

A1 - ELEMENTOS BÁSICOS DE UNA ESTACIÓN TIPO CAVERNA

Una estación subterránea construida con el Nuevo Método Austríaco y sus variantes recibe el nombre de estación tipo “Caverna”, en la cual se puede identificar 3 elementos estructurales definidos: el pique, la galería de conexión y el túnel inter-estación. El procedimiento constructivo de una estación subterránea tipo caverna considera la secuencia de estos elementos o conjunto de estructuras subterráneas.

La figura A1 muestra estos elementos típicos. La secuencia del procedimiento constructivo es, como indica el esquema, primero, la construcción del pique; segundo, la galería de conexión y, finalmente, el túnel inter-estación.

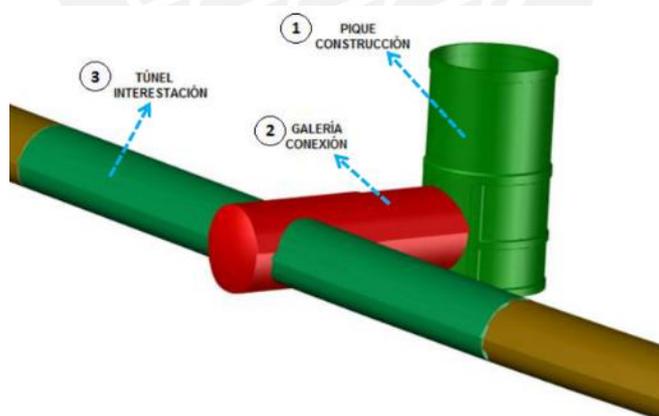


Fig. A1 - Elementos de una estación tipo caverna (González, 2016)

A 1.1 - Tipos de estaciones construidas con el Nuevo Método Austríaco

Un factor importante para determinar el tamaño y modelo de una estación subterránea es la demanda de usuarios, la cual también se expresa como flujo o volumen de pasajeros por hora en cada estación de metro.

Existen 3 tipos de estaciones clasificadas de acuerdo a su uso: estaciones terminales, estaciones de conexión con otras líneas y estaciones de paso o intermedias. En este último grupo se encuentran la mayoría de estaciones de una línea metro.

Los modelos básicos de estaciones subterráneas construidas con el Nuevo Método Austríaco corresponden a modelos de estaciones intermedias o regulares. A continuación, en la figura A2, se muestra la diferencia entre estos dos modelos de estaciones.

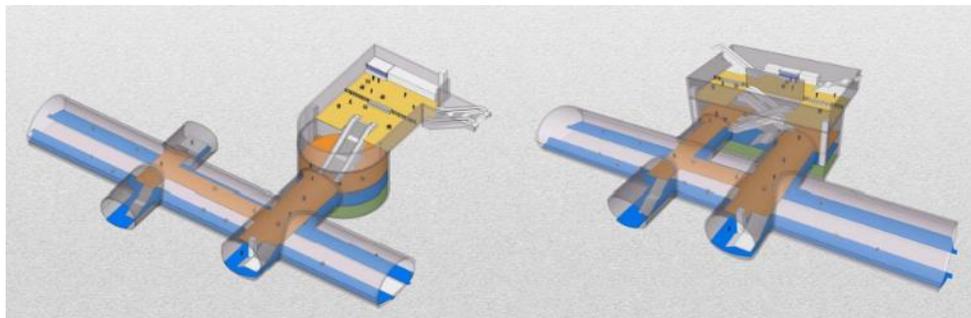


Fig. A2 - Modelos de estaciones subterráneas NATM (Velasco T, 2015)

De la figura anterior, se observa que ambas estaciones están conformadas por los elementos típicos descritos en el acápite anterior (6.1). La diferencia se encuentra en la disposición espacial de los elementos que conforman cada estación.

El modelo de lado izquierdo corresponde a la estación Cerrillos (una de las 6 estaciones intermedias) de la línea 6 del Metro de Santiago de Chile. Esta estación tiene un pique circular con una galería de conexión y otra galería de abordaje independiente.

Del lado derecho, se encuentra la estación Estadio Nacional. Esta estación por sus características tiene un pique rectangular diseñado para soportar alta capacidad de usuarios en eventos masivos.

Existen otros modelos de estaciones subterráneas que responden a las necesidades de la población, ya sea en los paraderos terminales o en centros comerciales donde la afluencia de usuarios sea alta. En capítulos posteriores, se evalúa los estudios de demanda realizados por la oficina de Proinversión – Perú, en los cuales se detalla la demanda de usuarios en cada estación de la línea 2 del metro de lima y Callao.

A 1.2 - Programación de una estación tipo Caverna

El Nuevo Método Austríaco, por su naturaleza se clasifica como método de ejecución subterránea, el cual durante su desarrollo no afecta el uso de estructuras en la superficie como vías, edificios e instalaciones. A continuación, se muestra en la figura A3, la vista isométrica del modelo de una estación tipo caverna, el modelo en particular corresponde a una estación de paso o intermedia.

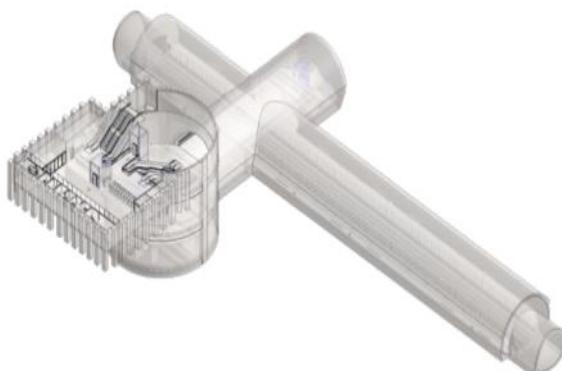
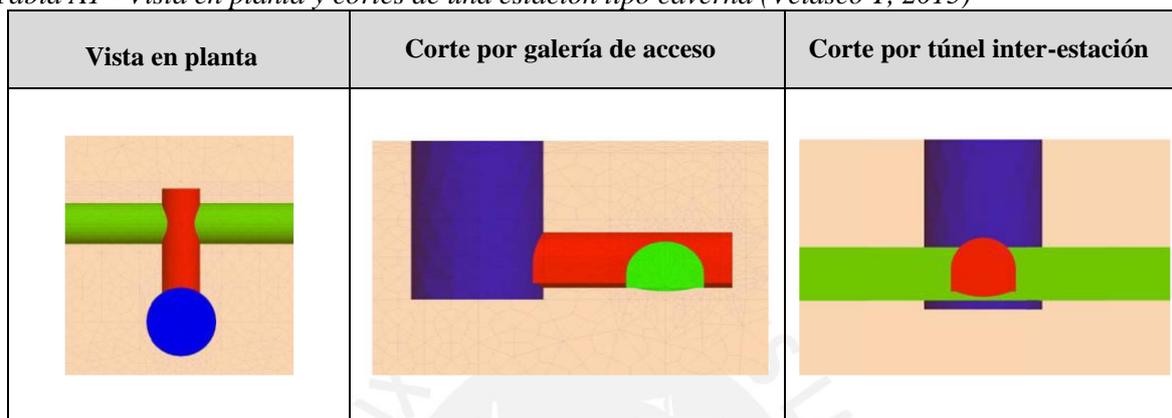


Fig. A3 - Vista isométrica de estación de paso o intermedia (Tunnel & Minning, 2015)

Las construcciones de estaciones subterráneas tipo caverna comprenden la ejecución en varias etapas. En cada una de estas se sigue el procedimiento propuesto por el Nuevo Método Austríaco y sus variantes de acuerdo a los elementos que conforman una estación de este tipo, tal como se mencionó en el marco teórico (véase capítulo 2)

La tabla A1 muestra la vista en planta y los cortes de una estación tipo caverna. La primera etapa es la construcción del pique; luego, la galería de acceso y, finalmente, el túnel inter-estación. En este último es donde se encuentran las plataformas para abordar el metro subterráneo.

Tabla A1 - Vista en planta y cortes de una estación tipo caverna (Velasco T, 2015)



Pique	
Galería de acceso o Bóveda	
Túnel inter-estación	

Primera etapa - Excavación del pique

La ejecución de una estación subterránea comienza con la construcción de un pique circular de diámetro entre 18 a 25m. y un revestimiento de concreto con espesor de 20 a 45cm. Este alcanza la profundidad de la cota de la galería de conexión (segunda etapa).

La figura A4 muestra una vista hacia el fondo de una bóveda o pique circular excavado para la construcción de la estación Inés Suarez – Línea 6 del metro de Santiago de Chile. Las profundidades que pueden alcanzar los piques son de 15 a 30m, dependiendo de los niveles que tenga la estación proyectada.



Fig. A4 - Bóveda o Pique Circular - Santiago de Chile, Línea 6 (Velasco T, 2015)

Segunda etapa - Excavación de la Galería de acceso o Bóveda

La segunda etapa en la construcción de una estación tipo caverna es la excavación de la galería de acceso o bóveda. Esta estructura sirve de conexión entre el pique y la plataforma de abordó (túnel inter-estación). La ejecución de esta sección se realiza con el método "Side drift" o deriva lateral, una variante del Nuevo Método Austríaco.

En la figura A5, se muestra una vista isométrica de la Galería de acceso (color celeste) y el túnel inter-estación (Color verde). Las líneas superiores en la corona de los túneles son los micro pilotes, también conocidos como paraguas.



Fig. A5 Vista Isométrica de Galería de acceso (Velasco T, 2015)

Tercera etapa - Excavación del túnel inter-estación.

La tercera etapa en la construcción de una estación tipo caverna es la excavación del túnel inter-estación. En esta estructura, se encuentra la plataforma de abordó de los trenes y las losas superiores de las galerías de acceso. Para la ejecución de esta sección se utiliza el Nuevo Método Austríaco y también la variante conocida como Método Tamez.

En la figura A6, se muestra un esquema geométrico y la vista real del túnel inter-estación construido con el Nuevo Método Austríaco. Se observa las plataformas laterales de abordó y la sección central por donde circulan los trenes. La vista corresponde a la estación Inés Suarez de la línea 6 del metro de Santiago de Chile.

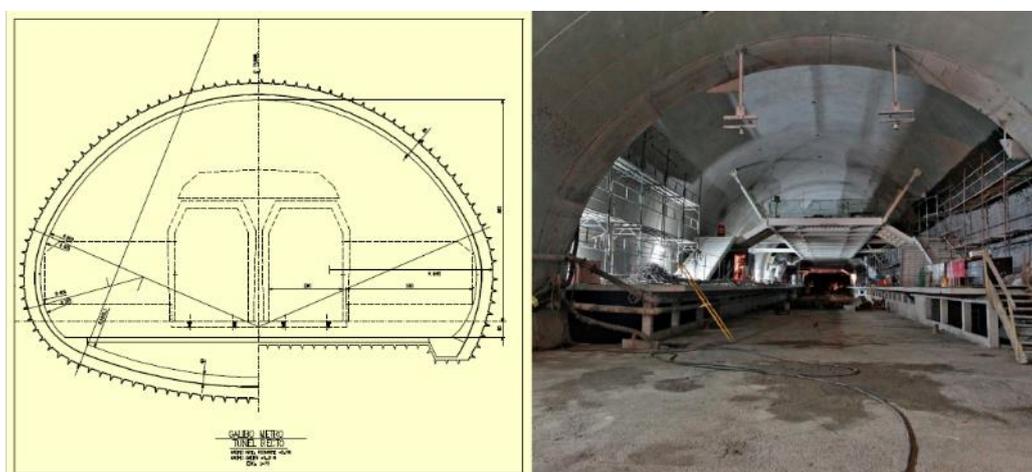


Fig.A6 - Vista Isométrica de Galería de acceso (Salzar B, 2011)

La tercera y última etapa en la construcción de una estación tipo caverna comienza con la ejecución de los entronques⁽⁹⁾. Esta estructura es la transición entre la galería de acceso y el túnel inter-estación. Se trata de un arco de concreto armado el cual circunda la superficie lateral a ambos lados de la galería de acceso, es aquí donde inicia la excavación del túnel inter-estación. A continuación, en la figura A7, se observa el detalle de la estructura conocida como “entronque”.



Fig. A7 - Sección de Entronque (Salzar B, 2011)

A 2 - ESTACIONES TIPO CUT AND COVER

A 2.1 - Características de una estación tipo Cut and Cover

Dentro de la clasificación correspondiente al diseño de una estación implementada con el método Cut and Cover para la línea metro subterránea, existe un modelo estandarizado llamado “estación a desnivel”. Este tipo de estaciones se encuentra en la mayoría de paraderos de la línea metro, salvo en aquellos donde se tenga interconexiones con otra red de metro existente.

Las estaciones a desnivel o Cut and Cover tienen como principal característica el modelo de dos sótanos simples con escaleras eléctricas. Cada sótano puede alcanzar alturas de entre 3 y 4 metros. De esta manera, existirán dos niveles de profundidad o plataformas bajo la vía de automóviles.

De acuerdo a su diseño, las estaciones a desnivel o Cut and Cover tienen básicamente cuatro elementos estructurales bien definidos:

- Escaleras de acceso: estas pueden ser mecánicas o de concreto y están a un desnivel con la vía superficial de automóviles.
- Plataforma superior: es el nivel inmediato al acceso desde la superficie. Esta plataforma está diseñada para la circulación de pasajeros y es un intermedio antes de descender al segundo sótano o andén.
- Andén: es la plataforma inferior que se encuentra a nivel de los accesos a los vagones del tren. Esta plataforma es también el nivel de piso terminado del segundo sótano que conforma la estación a desnivel.

- Vía del metro: es la línea férrea por donde circulan los vagones de la línea metro y se encuentra a un nivel máximo de profundidad de 1 metro respecto de la plataforma.

La figura A8 muestra los elementos que conforman una estación de línea metro a desnivel construida con el método Cut and Cover, aparte de las columnas y la losa superior, los demás elementos son parte de la utilería y señalética necesarias dentro de una estación subterránea de metro.



Fig. A8 - Elementos de una estación a desnivel (infovisual.es 2012)

Cuando se proyecta una estación subterránea con el método Cut and cover, existen patrones tanto en el diseño como en la distribución. Una estación de este tipo presenta los accesos en las partes laterales con 2 niveles, las vías férreas están centralizadas y van una a lado de otra.

A continuación, antes de detallar las etapas para la construcción de este tipo de estaciones, se muestran 2 vistas de estaciones subterráneas construidas con el método Cut and Cover. En la figura A9, Estación Hauptbahnhof en Múnich, se observa un sistema estructural aporricado con columnas centrales y apoyos en los muros laterales. Este modelo estructural en particular transmite una carga muerta importante al suelo central que, además, soporta la carga dinámica de los vagones de tren.

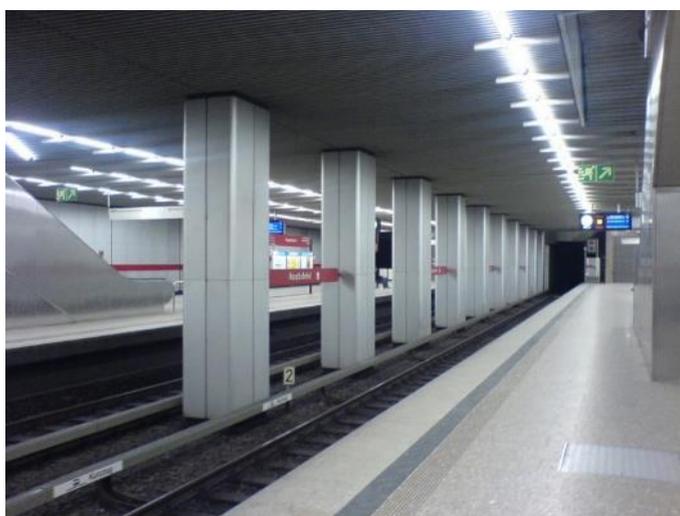


Fig. A9 - Estación Hauptbahnhof, Munich (EFE, 2010)

La figura A10 de la Estación Sáenz Peña en Santiago de Chile muestra en la parte superior un sistema estructural mixto con vigas prefabricadas que transmiten su carga distribuida al terreno través de los muros

laterales y pórticos de acero. A diferencia del modelo anterior, al no existir columnas centrales sobre la vía férrea, el suelo central únicamente soporta las cargas dinámicas de los vagones de tren.



Fig. A10 - Estación Sáenz Peña, Santiago de Chile (EFE, 2010)

A 2.2 - Programación de una estación proyectada con Cut and Cover

Una estación a desnivel construida con el método Cut and Cover, por lo general, presenta 2 macro-estructuras: La zona pública o andén de usuarios y la plataforma de abordó. Este último es el espacio por donde circula el sistema de transporte ferroviario.

Las estaciones intermedias, según las bases para la adjudicación (Proinversión, 2013) tienen como mínimo las macro-estructuras antes mencionadas. Específicamente la funcionalidad de cada nivel se define de la siguiente manera:

ANDÉN DE USUARIOS: Está ubicado en el sótano 1 y es una plataforma de 150 a 200 m² que tiene como finalidad ordenar y controlar el acceso de usuarios.

PLATAFORMA DE ABORDO: Está ubicada en el segundo sótano y es una plataforma de 800 a 100 m² aproximadamente, conformada por túneles a través de los cuales circulan los vagones.

La imagen A11 muestra un corte transversal de la estación proyectada con el método Cut and Cover. En ella se observa tanto la plataforma superior como la plataforma de abordó; asimismo, las estructuras de concreto armado que componen cada una de estas zonas.

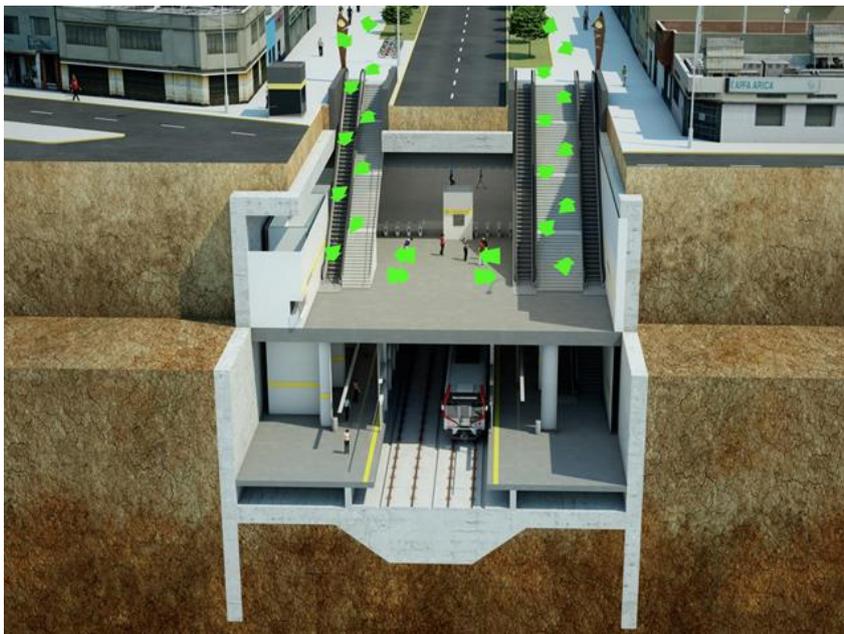


Fig. A11 - Estructura de una estación Cut and Cover (Proinversión, 2013)

La construcción de una estación subterránea con el método Cut and Cover se realiza en tres etapas: construcción de los Muros Milán, excavación de la Plataforma superior y excavación de la plataforma inferior o de abordó. A continuación, se explica de manera general cada etapa del procedimiento constructivo.

En la primera etapa, se interviene la carpeta asfáltica de la superficie y las secciones laterales para la construcción de los Muros Milán. Dependiendo de la estabilidad del terreno se utiliza lodo bentónico o agua para el proceso de vaciado de concreto armado.

La segunda etapa inicia con la excavación hasta el nivel del primer sótano. Luego de ello, se cubre la superficie con vigas prefabricadas para hacer los trabajos de “reposición de superficie”. Es importante esta sub etapa, pues permite reestablecer las actividades normales en la superficie como la circulación vehicular o actividades comerciales.

La tercera etapa se realiza internamente. Cuando la superficie ya se repuso, los trabajos de excavación del segundo sótano continúan acarreado el material a través del primer sótano y los ingresos que se dejaron.

En el capítulo 2 del marco teórico se explica a detalle todo el procedimiento constructivo del método Cut and Cover, así como la definición de los Muros Milán. En este apartado, se describe la aplicación del método para la construcción de estaciones a desnivel siguiendo las características de una estación para la línea metro.

A diferencia de la descripción, en el marco teórico se analiza la división por etapas, lo cual es importante para la planificación y sectorización de obra. En la siguiente tabla A2 se muestra de manera organizada las etapas en la construcción de una estación con el método Cut and Cover y las principales partidas que intervienen en cada una de las etapas.

Tabla A2 – Etapas de la construcción de una estación Cut and Cover

Etapa 1 – construcción de los Muros Milán	Orden cronológico de partidas
 <p data-bbox="359 629 675 656">Fig. A12 - Etapa 1 Muros Milán</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Levantamiento de la carpeta asfáltica - Construcción muros guía - Hincado de pilotes (suelos blandos) - Excavación con almeja hidráulica - Armado de acero del Muro Milán - Vaciado de agua o lodo bentónico (suelos blandos) - Vaciado de concreto por secciones
Etapa 2 – Excavación de plataforma superior	Orden cronológico de partidas
 <p data-bbox="325 1128 708 1155">Fig. A13 - Etapa 2 Plataforma Superior</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vaciado de pilotes in-situ (columnas del segundo sótano) - Excavación de la plataforma superior - Construcción de la losa del sótano 1 - Colocación de vigas pre-fabricadas - Vaciado de losa superficial - Reposición de la carpeta asfáltica
Etapa 3 – Excavación de la Plataforma inferior	Orden cronológico de partidas
 <p data-bbox="325 1659 708 1688">Fig. A14 - Etapa 3 Plataforma Inferior</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Excavación de la plataforma inferior - Construcción de la losa del sótano 2 - Colocación de plataformas de abordo - Construcción de accesos

Fuente gráfica: Concesión de la Línea 2 y Ramal Faucett-Gambeta Línea 4 (Proinversión, 2013)

Al finalizar las excavaciones de la etapa 3 en la construcción de una estación Cut and Cover, se da el encuentro entre la plataforma inferior y el túnel construido por las maquinarias TMB. En la figura A15, se observa las dovelas del túnel construido con TMB que atraviesan la plataforma inferior. Los acabados de la estación incluyen la demolición de este tramo de túnel excavado con TMB.

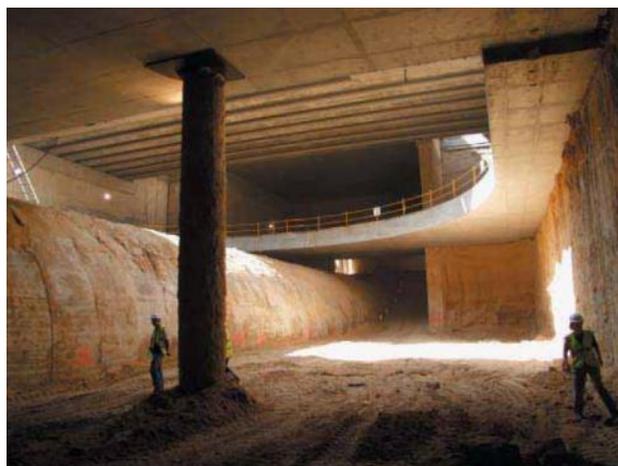


Fig. A15 - Encuentro del túnel TBM con la estación Cut and Cover (Proinversión, 2013)

A 3 - ESTUDIO DE LA DEMANDA DE USUARIOS EN LAS ESTACIONES

La Agencia de Promoción de la Inversión Privada (Proinversión) realizó los estudios de demanda de usuarios en las estaciones con una proyección al 2020. Los valores corresponden al número de pasajeros que se encuentran en una estación en un determinado momento. El escenario evaluado es la hora pico matutina (HPM) y se consideran los pasajeros que van en los vagones, los que suben y los que bajan.

La figura A16 muestra dos gráficos. En el primero de ellos, se detalla la demanda de usuarios en el recorrido este-oeste y el segundo gráfico corresponde al recorrido oeste-este.

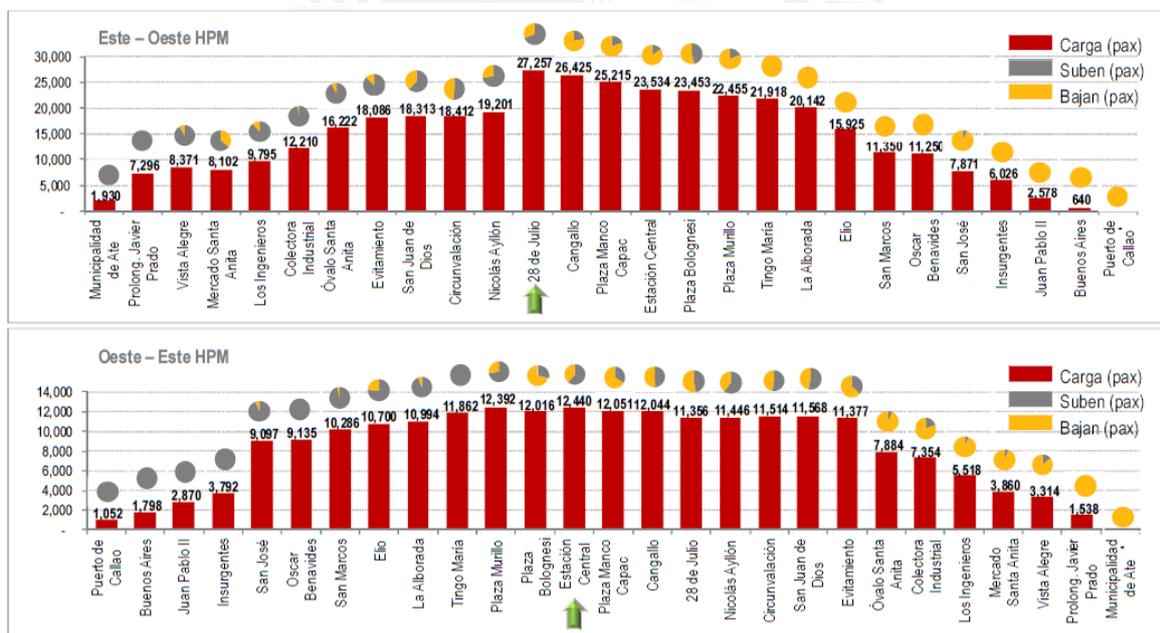


Fig. A16 – Estudio de demanda de usuarios en cada estación (Proinversión. 2013)

Para efectos de la presente tesis, el análisis de los estudios de demanda de usuarios se centra en las estaciones emplazadas en la Provincia Constitucional del Callao. La tabla A3 muestra la proyección de pasajeros al 2020 en cada estación de la Línea 2. Por otro lado, la Tabla A4 muestra la demanda en las estaciones del Ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4. En cada tabla se presentan dos bloques correspondientes a las estimaciones de usuarios en la hora pico matinal (HPM) en ambas direcciones.

Tabla A3 – Estudio de demanda de usuarios en las estaciones de la Línea 2

Recorrido Este-Oeste (HPM)		Recorrido Oeste-Este (HPM)	
Estación	Usuarios	Estación	Usuarios
Oscar Benavides	11250	Puerto del Callao	1052
San José	7871	Buenos Aires	1798
Insurgentes	6026	Juan Pablo II	2870
Juan Pablo II	2578	Insurgentes	3792
Buenos Aires	640	San José	9097
Puerto del Callao	426	Oscar Benavides	9135

Tabla A4 – Estudio de demanda de usuarios en las estaciones del Ramal Faucett-Gambeta

Recorrido Sur-Norte (HPM)		Recorrido Norte-Sur (HPM)	
Estación	Usuarios	Estación	Usuarios
Argentina	10347	Gambeta	1281
Morales Duarez	7879	Canta callao	3127
Quilca	4174	Bocanegra	4370
El Olivar	2760	Aeropuerto	5087
Aeropuerto	3278	El Olivar	6784
Bocanegra	2105	Quilca	7361
Canta callao	1759	Morales Duarez	8763
Gambeta	930	Argentina	9257

En la hora pico matutina observamos que en el recorrido este-oeste de la línea 2 (tabla A3) la demanda de pasajeros en la estación Oscar Benavides es de 11250 y decrece conforme se van pasando las estaciones intermedias hasta llegar al Puerto del Callao con una demanda de 426 pasajeros. Esta es cada vez menor en cada estación, pues los usuarios se quedan en sus centros de estudios o laborales hasta que el tren llega al Puerto.

Se observa el caso contrario en el recorrido oeste-este de la Línea 2 (tabla A4, columna derecha), pues la demanda de usuarios va en aumento en este sentido. La estación Puerto del Callao tiene una demanda de 1052 (mayor que en el recorrido este-oeste), ya que los usuarios proyectan sus viajes hacia las otras estaciones emplazadas en zonas industriales o financieras. De este modo, se proyecta una demanda de 9135 en la estación Oscar Benavides.

La demanda de usuarios y su proyección es un parámetro que se toma en cuenta para el diseño de las estaciones. Se prevee un alza de usuarios de acuerdo con los índices de crecimiento demográfico. También se siguen lineamientos tomando en cuenta la zonificación o la actividad comercial que se desarrolle en los emplazamientos. Estos aspectos se analizan en el siguiente acápite.

^(h) Concesión de la Línea 2 y Ramal Faucett-Gambeta Línea 4 (Pro inversión, 2013)

A 4 - ZONIFICACIÓN Y ACTIVIDAD ECONÓMICA

En el caso de Lima Metropolitana, podemos observar que la estación central del Metropolitano tiene 2 sótanos e incluso áreas comerciales en el primero. Por otro lado, las estaciones finales de este sistema de transporte urbano (Estación naranjal y Estación Matelini) tienen características distintas que responden a la afluencia de usuarios y sus necesidades en estos puntos de la red vial.

La zonificación está condicionada al tipo de actividad económica que se desarrolla en la zona de influencia de la Línea 2 y el Ramal de la Línea 4. Los entes que generan viajes son las medianas y grandes empresas, Pymes, y el sector informal. La actividad industrial y los servicios son desarrollados por las medianas y grandes empresas.

En la Provincia Constitucional del Callao se encuentran de manera específica los siguientes espacios:

- Entidades Gubernamentales
- Puerto del Callao
- Aeropuerto

Para efectos del análisis comparativo se resume el emplazamiento de las estaciones en tres zonas: Residencial, Comercial e Industrial. La tabla A5 muestra el emplazamiento de las estaciones de la Línea 2 y la demanda proyectada.

Tabla A5 – Zonificación de las estaciones de la Línea 2 (Proinversión, 2013)

Estación	Recorrido Este-Oeste (HPM)	Recorrido Oeste-Este (HPM)	Zona
Insurgentes	6026	3792	Residencial
Juan Pablo II	2578	2870	
Buenos Aires	640	1798	
San José	7871	9097	Comercial
Oscar Benavides	11250	9135	Industrial
Puerto del Callao	426	1052	

Se concluye que las estaciones de la Línea 2 emplazadas en la Provincia Constitucional del Callao corresponden en su mayoría a zonas residenciales, salvo la estación San José y las estaciones Oscar Benavides y Puerto del Callao, las cuales están emplazadas en zonas comercial e industrial, respectivamente.

La demanda proyectada en la estación Puerto del Callao es baja con relación a la demanda proyectada en la estación San José, pese a que la primera es una zona industrial. Esto ocurre debido a que la estación Puerto del Callao es la última del tramo de la Línea dos y porque gran parte de la población trabaja precisamente en el puerto y no requiere utilizar el metro para llegar a su centro de labores. Sin embargo, la estación San José- al estar emplazada en una zona comercial- tiene una demanda proyectada de 7861 y 9097 en los sentidos este-oeste y oeste-este respectivamente. Asimismo, está localizada en un intercambio vial importante como es el cruce de las Avenidas Faucett y Oscar Benavides (Colonial).

De manera similar al análisis anterior en las estaciones de la Línea 2, la tabla A6 muestra el emplazamiento de las estaciones del Ramal Faucett-Gambeta de la Línea 4, así como la demanda que se proyecta en cada una.

Tabla A6 – Zonificación de las estaciones del ramal Faucett-Gambeta Línea 4 (Proinversión, 2013)

Estación	Recorrido Sur-Norte (HPM)	Recorrido Norte-Sur (HPM)	Zona
Morales Duarez	7879	9257	Residencial
Canta callao	1759	3127	
Argentina	10347	1281	Comercial
Aeropuerto	3278	5087	

Quilca	4174	7361	Industrial
El Olivar	2760	6784	
Bocanegra	2105	4370	
Gambeta	930	1281	

En este caso, a diferencia del emplazamiento de las estaciones de la Línea 2, la mayoría de estaciones están ubicadas en zonas comerciales e industriales, lo cual responde a la urgencia con la que este tramo fue concesionado junto con la línea 2. Las demandas proyectadas en las zonas comerciales e industriales son claramente mayores a las demandas en las estaciones de zonas residenciales.

Las estaciones Quilca, El Olivar, Bocanegra y Gambeta se encuentran emplazadas en zonas industriales dedicadas a empresas de aduanas y aeroportuarias, la última de la lista está localizada cerca de almacenes para contenedores que llegan al Puerto del Callao. La principal actividad de este sector gira en torno a la industria del transporte marítimo y aéreo. Por esta razón, se proyecta gran demanda de usuarios en las estaciones de este ramal de la Línea 4.

En la zona comercial, se encuentran las estaciones Argentina y Aeropuerto. Esta última tendrá un túnel directo hacia el counter de pasajeros al interior del edificio del Jorge Chávez. Finalmente, las únicas estaciones en este tramo que corresponden a la zonificación residencial son la estación Morales Duarez y la estación Canta callao.

En la tabla A7 se detalla, independientemente del método constructivo, la infraestructura de las estaciones de acuerdo a su zonificación siguiendo patrones a modelos de otras estaciones de metro en ciudades capitales de Sudamérica.

Tabla A7 – Infraestructura de los tipos de estaciones.

Tipos	Características
Estaciones simples	<ul style="list-style-type: none"> - 2 sótanos - 2 accesos principales - 2 salidas de emergencia
Estaciones terminales	<ul style="list-style-type: none"> - 2 sótanos - 4 salidas de emergencia - Plataformas amplias
Estaciones comerciales	<ul style="list-style-type: none"> - 2 a 4 sótanos - 4 salidas de emergencia - Sistemas de túneles (conexión con otras líneas)

A 5 - CLASIFICACIÓN

DE VÍAS DE ACUERDO A MTC

El ramal de la Línea 4 del metro de Lima comprende las avenidas Elmer Faucett y Néstor Gambeta. Estas vías tienen una clasificación de “Vías Expresas” de acuerdo al SVML (Sistema vial metropolitano de Lima), además de estar definidas como vías de alto tránsito y de flujo ininterrumpido. De esta manera, los distritos involucrados en este trazo de la línea 4 son los siguientes: La Punta, Bellavista, Carmen de la Legua, Callao, San Martín de Porres y Ventanilla, los cuales constituyen la zona de influencia del proyecto.

La integración de Lima Metropolitana con la Provincia Constitucional del Callao es a través de las siguientes avenidas:

- Av. Morales Duarez
- Av. Argentina
- Av. Oscar Benavides (Colonial)
- Av. La Marina

Adicionalmente, las vías alimentadoras al Puerto del Callao son las siguientes:

- Av. Néstor Gambeta
- Av. Tomas Valle
- Ferrocarril Central

Por último, las vías alimentadoras al Aeropuerto y oficinas de Aduanas son las que se señalan a continuación:

- Av. Elmer Faucett
- Av. Tomas Valle

De acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el sistema vial metropolitano de Lima y Callao se extiende en 1100 km (proyectados en 1800 km). Estos kilómetros se encuentran integrados en 68 intercambios viales (proyectados en 230 intercambios viales). Las proyecciones de la red vial metropolitana corresponden a los estudios integrados para la red básica de metros de Lima y Callao, la cual comprende la ejecución de 5 líneas metro al año 2048.

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, las características de la red vial de Lima Metropolitana y Callao están divididas en 4 tipos, los cuales se describen a continuación en la tabla A8.

Tabla A8 - Características de la red vial metropolitana de Lima y Callao

Tipo de vía	Características
Vías Expresas 350.1 km de longitud	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Son las vías que soportan importantes volúmenes de vehículos con circulación de alta velocidad en condiciones de flujo libre y unen zonas de importante generación de tránsito. ▪ En estas vías el flujo es ininterrumpido, no existen cruces al mismo nivel con otras vías, sino a diferentes niveles o con intercambios especialmente diseñados. ▪ En caso se permita servicio de transporte público de pasajeros, este debe desarrollarse por buses, preferentemente en calzadas exclusivas con paraderos debidamente diseñados.
Vías Arteriales 547.4 km de longitud	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Son aquellas que también llevan apreciables volúmenes de vehículos entre áreas principales de generación de tránsito y a velocidades medias de circulación. ▪ A grandes distancias se requiere de la construcción de pasos a desnivel y/o intercambios que garanticen una mayor velocidad de circulación. Pueden desarrollarse intersecciones a nivel con otras vías arteriales y/o colectoras ▪ El transporte público autorizado de pasajeros debe desarrollarse preferentemente por buses.
Vías Colectoras 605.8 km de longitud	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Son aquellas vías que tienen por función llevar el tránsito desde un sector urbano hacia las vías arteriales y/o expresas. Sirven también a una buena proporción de tránsito de paso. Prestan, además, servicio a las propiedades adyacentes. ▪ El flujo de tránsito es ininterrumpido frecuentemente por intersecciones sanforizadas en los cruces con vías arteriales y otras vías colectoras.

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En el caso que la vía sea autorizada para el transporte público de pasajeros se debe establecer y diseñar paradores especiales.
Vías Locales 1694.5 km de longitud	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Son aquellas vías cuya función es proveer acceso a los predios o lotes adyacentes. Su definición y aprobación, cuando se trate de habilitaciones urbanas, corresponde a las Municipales distritales.^(h)

^(h)Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial (MTC, 2013)

Para una clasificación más técnica del emplazamiento de cada una de las estaciones del metro, es necesario conocer la clasificación de las vías en las cuales se encuentran las estaciones. De acuerdo al recorrido de la línea 2 del metro de Lima y el ramal de la línea 4 se ha identificado que el trazo recorre las siguientes avenidas principales en la Provincia Constitucional del Callao.

En la tabla A9, se muestra la clasificación de las vías de acuerdo al sistema vial metropolitano de Lima y Callao. Se observa que la línea metro considera en su recorrido solo vías expresas y arteriales, la codificación que acompaña la clasificación vial representa el inventario y la lámina correspondiente en cada caso, anteponiendo la letra “E” cuando se trata de una vía expresa y la letra “A” cuando es una vía arterial.

Tabla A9 – Clasificación del sistema vial metropolitano de Lima y Callao (O-341 ML, MTC, 2011)

Vía	Clasificación	Lámina	Tipo
Av. Elmer Faucett	E-33	23	Expresas
Av. La Marina	E-33	23	
Av. Néstor Gambeta	E-08	07	
Av. Morales Duarez	A-110	138	Arteriales
Av. Argentina-A	A-21	50	
Av. Argentina-B	A-22	51	
Av. Oscar Benavides-A	A-47	75	
Av. Oscar Benavides-B	A-48	76	
Av. Tomas Valle-A	A-161	189	
Av. Tomas Valle-B	A-162	190	
Av. Tomas Valle-C	A-163	191	
Av. Tomas Valle-D	A-164	192	

Cada estación de la línea metro está emplazada en una intersección vial con características propias de acuerdo a su clasificación dentro del sistema vial metropolitano de Lima y Callao. Las intersecciones pueden tener las siguientes denominaciones: semaforizada, paso a desnivel u óvalos. El análisis del emplazamiento en las intersecciones es importante porque los accesos a las estaciones subterráneas dependerán de la geometría o diferencia de niveles en las intersecciones. De esta manera, una estación emplazada en un óvalo tendrá accesos distintos a una estación emplazada en una intersección con paso a desnivel.

La tabla A10 muestra a detalle el emplazamiento y la clasificación de las vías en las intersecciones de las estaciones para la Línea 2 del Metro de Lima dentro de la jurisdicción de la Provincia Constitucional del Callao. En este caso, el recorrido de la línea 2 sigue el trazo de dos avenidas arteriales: Av. O. Benavides ex Av. Colonial y la Av. Guardia Chalaca. Las intersecciones más recurrentes en este trazo son la semaforizada y el paso a desnivel; por el contrario, encontramos solo una intersección en óvalo.

Tabla A10 – Análisis de la intersección vial en las estaciones de la Línea 2

Estación	Intersección		Intercambio Vial	Tipo Intersección
Oscar Benavides	Av. O. Benavides	Av. Amezaga	Arterial-Local	Semaforizada
San José	Av. O. Benavides	Av. Faucett	Arterial-Expresa	Desnivel
Insurgentes	Av. O. Benavides	Av. Los Insurgentes	Arterial-Colectora	Semaforizada
Juan Pablo II	Av. O. Benavides	Av. Juan Pablo II	Arterial-Local	Semaforizada
Buenos Aires	Av. G. Chalaca	Av. Oscar Benavides	Arterial-Arterial	Desnivel
Puerto del Callao	Av. G. Chalaca	Av. Argentina	Arterial-Arterial	Óvalo

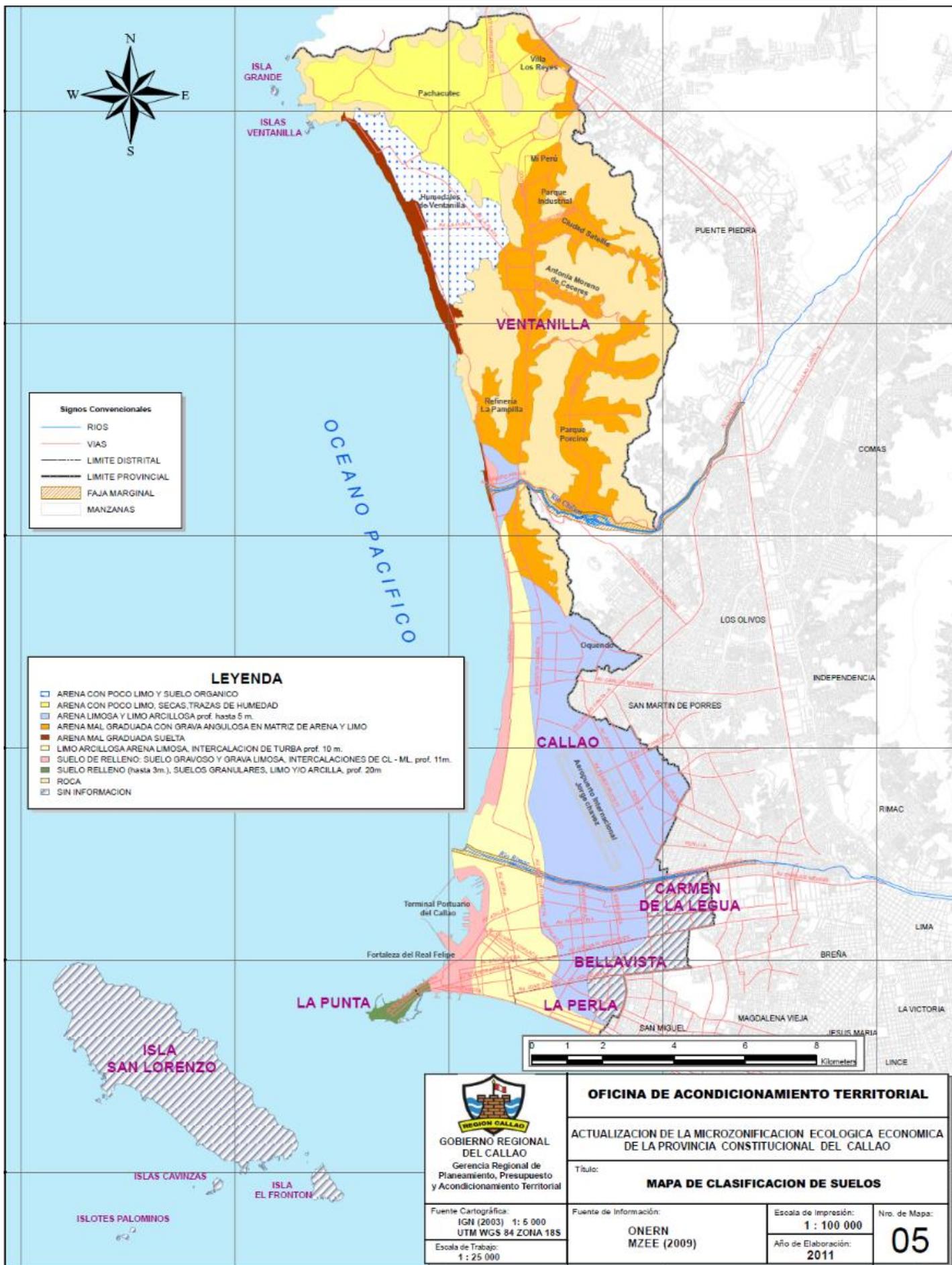
A diferencia del trazo de la línea 2, el ramal de la línea 4 tiene todas sus estaciones dispuestas sobre una vía expresa (Av. Elmer Faucett). Como se detalla en la tabla A8 en las vías expresas el flujo es ininterrumpido y no existen cruces al mismo nivel con otras vías, sino a diferentes niveles o con intercambios especialmente diseñados. El diseño de los accesos a las estaciones subterráneas deberá tomar en cuenta esta consideración. En el caso de las estaciones El olivar y Bocanegra no existen intercambios viales y la distribución vehicular es por vías alternas interconectadas.

De manera similar a la anterior, la tabla A11 muestra el detalle de las intersecciones del ramal de la línea 4 emplazadas en la Provincia Constitucional del Callao.

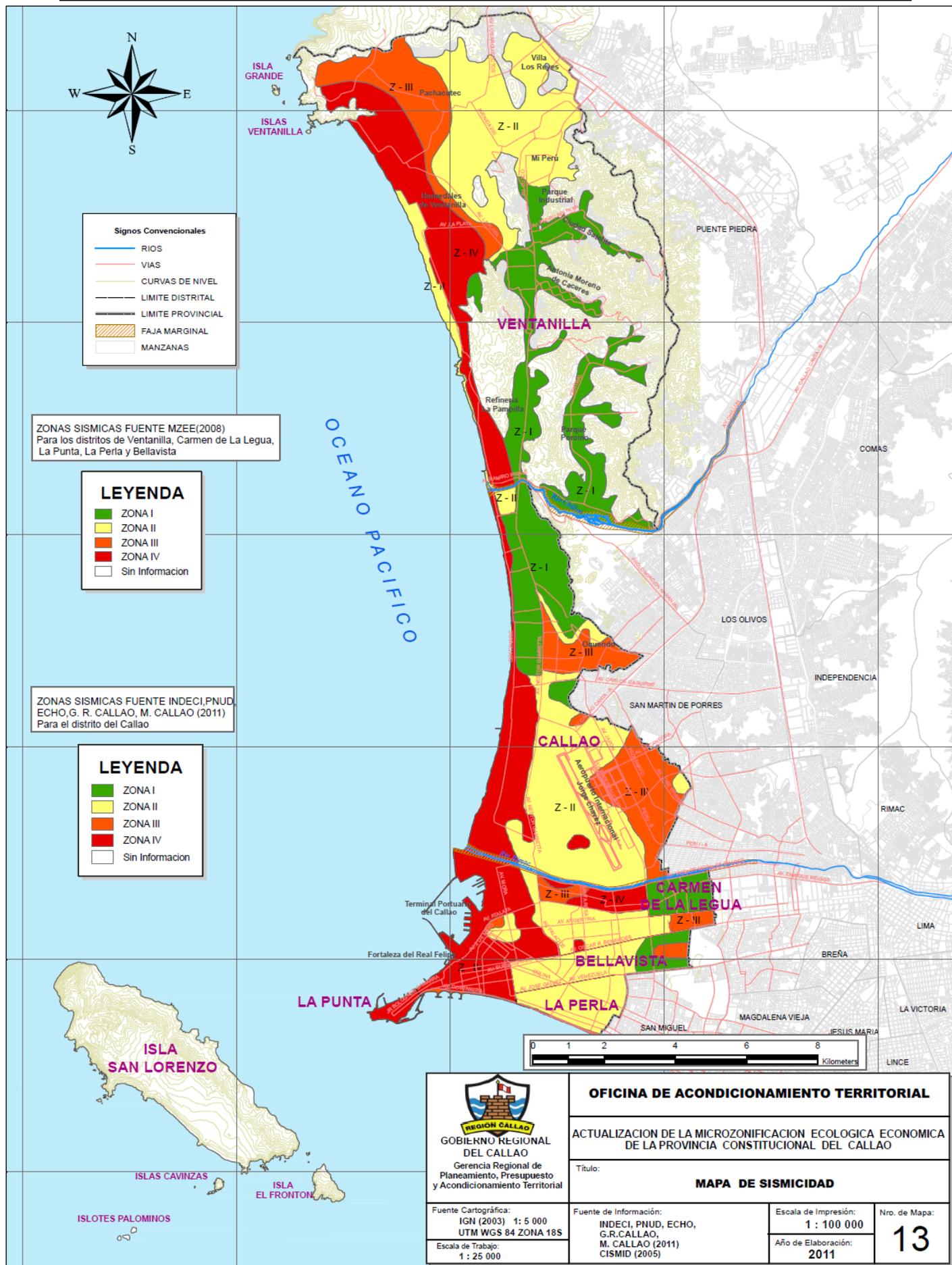
Tabla A 11 – Análisis de la intersección vial en las estaciones en el ramal de la línea 4

Estación	Intersección		Intercambio Vial	Tipo Intersección
Argentina	Av. E. Faucett	Av. Argentina	Expresa-Arterial	Semaforizada
Morales Duarez	Av. E. Faucett	Av. Morales Duarez	Expresa-Arterial	Semaforizada
Quilca	Av. E. Faucett	Av. Quilca	Expresa-Local	Desnivel
El Olivar	Av. E. Faucett	Av. El Olivar	Expresa-Local	Ininterrumpido
Aeropuerto	Av. E. Faucett	Av. Tomas Valle	Expresa-Arterial	Óvalo
Bocanegra	Av. E. Faucett	Av. Bocanegra	Expresa-Colectora	Ininterrumpido
Canta callao	Av. E. Faucett	Av. Canta Callao	Expresa-Expresa	Semaforizada
Gambeta	Av. E. Faucett	Av. N. Gambeta	Expresa-Expresa	Óvalo

Anexo B1 - MAPA DE SUELOS DE LA PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO



Anexo B2 - MAPA SISMICO DE LA PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO



Anexo B4 - ESTIMACIÓN DE LOS GASTOS GENERALES Y DE MAQUINARIA

			Mes.01	Mes.02	Mes.03	Mes.04	Mes.05	Mes.06	Mes.07	Mes.08	Mes.09
			Ene-18	Feb-18	Mar-18	Abr-18	May-18	Jun-18	Jul-18	Ago-18	Set-18
GASTOS GENERALES - NATM											
PERSONAL DE INGENIERIA Y TECNICOS			1,097,587	121,954							
INGENIERO RESIDENTE	9,876	1	88,880	9,876	9,876	9,876	9,876	9,876	9,876	9,876	9,876
INGENIERO PRODUCCION	7,597	1	68,369	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597
INGENIERO DE CALIDAD	7,597	1	68,369	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597
MAESTRO DE OBRA	3,628	2	65,304	7,256	7,256	7,256	7,256	7,256	7,256	7,256	7,256
PRACTICANTE DE INGENIERIA	6,077	1	54,693	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077
CAPATAZ DE PRODUCCION Y CALIDAD	7,825	2	140,850	15,650	15,650	15,650	15,650	15,650	15,650	15,650	15,650
ADMINISTRADOR	6,077	1	54,696	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077
ALMACENERO	7,825	1	70,425	7,825	7,825	7,825	7,825	7,825	7,825	7,825	7,825
VIGILANTE	4,500	1	40,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
VIGILANCIA POLICIAL	4,500	1	40,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
PEONES	4,500	10	405,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000

GASTOS GENERALES - CUT AND COVER											
PERSONAL DE INGENIERIA Y TECNICOS			731,725	121,954							
INGENIERO RESIDENTE	9,876	1	59,254	9,876	9,876	9,876	9,876	9,876	9,876	9,876	9,876
INGENIERO PRODUCCION	7,597	1	45,580	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597
INGENIERO DE CALIDAD	7,597	1	45,580	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597	7,597
MAESTRO DE OBRA	3,628	2	43,536	7,256	7,256	7,256	7,256	7,256	7,256	7,256	7,256
PRACTICANTE DE INGENIERIA	6,077	1	36,462	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077
CAPATAZ DE PRODUCCION Y CALIDAD	7,825	2	93,900	15,650	15,650	15,650	15,650	15,650	15,650	15,650	15,650
ADMINISTRADOR	6,077	1	36,464	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077	6,077
ALMACENERO	7,825	1	46,950	7,825	7,825	7,825	7,825	7,825	7,825	7,825	7,825
VIGILANTE	4,500	1	27,000	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
VIGILANCIA POLICIAL	4,500	1	27,000	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
PEONES	4,500	10	270,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000

GASTOS GENERALES											
			Mes.01	Mes.02	Mes.03	Mes.04	Mes.05	Mes.06	Mes.07	Mes.08	Mes.09
			Ene-18	Feb-18	Mar-18	Abr-18	May-18	Jun-18	Jul-18	Ago-18	Set-18
MAQUINARIA - MÉTODO NATM	150,000		1,308,000	84,000	84,000	176,000	176,000	176,000	176,000	176,000	84,000
CARGADOR FRONTAL	12,000	2	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
RETROEXCAVADORA	14,000	1	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000
EQUIPO LIGERO	8,000	2	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000
CAMIÓN PARA ACARREO	8,000	1	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
MINI CARGADOR BOBCAT	6,000	2	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000
ELEVADOR	10,000	1	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
CINTA VERTICAL	25,000	1	25,000		25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000
ROBOSHOP SMP-500	22,000	1	22,000		22,000	22,000	22,000	22,000	22,000	22,000	22,000
JUMBO BOOMER L2 C	15,000	1	15,000		15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
ENCOFRADO SOBRE RIEL	20,000	1	20,000		20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
MANIPULADOR TELESCÓPICO	10,000	1	10,000		10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
MAQUINARIA - CUT AND COVER	81,000		776,000	84,000	152,000	152,000	152,000	152,000	84,000		
CARGADOR FRONTAL	12,000	2	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000		
RETROEXCAVADORA	14,000	1	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000		
EQUIPO LIGERO	8,000	2	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000		
CAMIÓN PARA ACARREO	8,000	1	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000		
MINI CARGADOR BOBCAT	6,000	2	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000		
ELEVADOR	10,000	1	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000		
ALMEJA HIDRÁULICA	23,000	2	46,000	46,000	46,000	46,000	46,000	46,000			
BOMBA DE LODO BENTONITICO	11000	2	22,000	22,000	22,000	22,000	22,000	22,000			