

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluar los beneficios de un sistema de construcción con vigas prefabricadas de concreto armado, para la superestructura del sistema ferroviario monorraíl en comparación con el sistema duorraíl para el metro de Monterrey.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Máster en construcción y saneamiento

Presentado por:

Jimmy Javier Brito Gálvez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi familia que siempre me dio su apoyo incondicional para todo este proceso de masterado, a mi papá que supo darme consejos sobre cómo llevar la situación académica pese a mi trabajo y a mi mamá que estuvo para darme apoyo y aliento a seguir adelante en este proceso para mi desarrollo profesional.

Dedico este proyecto a la población ecuatoriana ya que la finalidad de este trabajo es la captación de nuevas metodologías constructivas e innovadoras para poder implementarlas en el país como una solución al transporte público.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la empresa constructora MotaEngil-México la cual está llevando a cabo la construcción del proyecto para este caso de estudio. También, agradezco al Ing. Jimmy Brito Izquierdo por brindarme el apoyo con la información y conocimiento técnico para realizar este trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jimmy Javier Brito Gálvez* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Autor

EVALUADORES

.....
Nombre del Profesor

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Nombre del Profesor

PROFESOR TUTOR

Nombre del Profesor

PROFESOR CO-TUTOR

Nombre del Profesor

REVISOR EXTERNO

RESUMEN

En la ciudad de Monterrey se está llevando a cabo la ampliación de las líneas del metro con un nuevo sistema denominado tipo monorriel utilizando elementos estructurales prefabricados de concreto, este proyecto afronta problemas tanto como de diseño y construcción para poder adaptarse a las necesidades presentes en la ciudad. Por lo cual, es necesario definir y comparar este nuevo sistema de metro con los anteriores ya implementados para así llegar a una recomendación válida sobre este nuevo sistema de metro, resolviendo sus principales problemas que se tiene como el espacio reducido por donde intervendrán las líneas de metro, el cuidado de la imagen urbana para no afectar las zonas comerciales y residenciales, y la reducción del impacto ambiental por los procesos constructivos.

Para el presente trabajo se analizó y evaluó la información proporcionada por la empresa responsable de la construcción de las nuevas líneas del metro donde el grupo de ingeniería de la empresa estableció los procesos constructivos y la calidad de los materiales a implementarse en este proyecto usando las normas vigentes de la ASTM y la ACI.

La implementación de este nuevo sistema de metro tipo monorriel con elementos prefabricados de concreto para la superestructura dio como resultado en el diseño la reducción de tiempo en los procesos constructivos, la disminución del impacto ambiental en las zonas a intervenir y la disminución de la afectación a la imagen urbana en las áreas comerciales y residenciales concluyendo que este nuevo sistema de metro es más beneficioso para la ciudad de Monterrey

Palabras Clave: Monorriel, Metro, Elementos Prefabricados y Monterrey.

ABSTRACT

In the city of Monterrey, the expansion of the subway lines is being carried out with a new system for the city called Monorail using precast concrete structural elements. This project faces both design and construction problems in order to adapt to the needs of the city. Therefore, it is necessary to define and compare this new metro system with the previous ones already implemented in order to provide a valid recommendation on this new metro system, solving its main problems, such as the reduced space where the lines will intervene, the care of urban image so as not to affect commercial and residential areas, and also the reduction of the environmental impact of construction processes.

For the present work, the information provided by the company that is responsible for the construction of the new subway lines was analyzed and evaluated, where the engineering group of the company established the construction processes and the quality of the materials to be implemented in the project using the current standards of ASTM and ACI.

The implementation of this new monorail metro system with precast concrete elements for the superstructure resulted in the reduction of time in the construction processes, the reduction of the environmental impact in the areas to be intervened and the non-affectation of urban image of the commercial and residential areas concluding that this new metro system is more beneficial for the city of Monterrey.

Keywords: *Monorail, Subway, Precast Elements and Monterrey.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	5
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE PLANOS	XIV
CAPÍTULO 1	16
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Localización	18
1.3 Justificación	19
1.4 Objetivos	23
1.4.1 Objetivo General	23
1.4.2 Objetivos Específicos	23
CAPÍTULO 2	24
2. ESTADO DEL ARTE	24
2.1 Sistemas ferroviarios	24
2.2 Sistema de metro tipo Monorriel	26
2.2.1 Sistema de metro tipo Monorriel Horcajadas	27
2.2.2 Sistema de metro tipo Monorriel Suspendido	28

2.3	Sistema de metro Duorriel o Tren Ligero	29
2.3.1	Sistema de metro Tren Ligero sobre la superficie	29
2.3.2	Sistema de metro Tren Ligero elevado.	31
2.3.3	Sistema de metro Tren Ligero subterráneo.....	32
2.4	Sistema de elementos prefabricados de concreto en la construcción de ferrocarriles.....	34
2.5	Sistemas de metro aplicado en la ciudad de Monterrey, líneas 1, 2 y 3	36
2.5.1	Metro de Monterrey línea 1	37
2.5.2	Metro de Monterrey línea 2	39
2.5.3	Metro de Monterrey línea 3	42
2.6	Equipos y materiales para el proceso constructivo de la superestructura del sistema de metro duorriel tren ligero y monorriel.....	44
2.6.1	Equipos	44
2.6.2	Materiales.....	53
2.7	Proceso constructivo de la superestructura del sistema convencional duorriel tren ligero sobre viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto	62
2.7.1	Montaje de las dovelas prefabricadas	62
2.7.2	Unión de las dovelas	64
2.8	Proceso constructivo de la superestructura para el sistema monorriel sobre viga	68
2.8.1	Montaje de vigas prefabricadas para monorriel	68
2.8.2	Colado de juntas de vigas	71
CAPÍTULO 3.....		73
3.	METODOLOGÍA	73
3.1	Identificación de los antecedentes	74
3.2	Descripción de los sistemas de metro para los casos de estudio.....	74

3.3	Método para comparar los sistemas de metro duorriel tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto versus sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto.....	75
3.3.1	Método de evaluación para los procesos constructivos	75
3.3.2	Método de evaluación del ámbito económico	78
3.3.3	Método de evaluación del impacto ambiental	81
3.3.4	Esquema de la tabla comparativa de los casos de estudio.....	84
3.4	Selección del sistema de metro a construirse en la ciudad de Monterrey	85
3.4.1	Método de puntaje para los procesos constructivos	85
3.4.2	Método de puntaje para el ámbito económico.....	86
3.4.3	Método de puntaje para el impacto ambiental.....	87
3.4.4	Selección del sistema de metro	88
CAPÍTULO 4.....		89
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE SOSTENIBILIDAD.....		89
4.		89
4.1	Análisis de los procesos constructivos.....	89
4.1.1	Análisis para el sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto	89
4.1.2	Análisis para el sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto.....	93
4.2	Análisis del ámbito económico.....	97
4.2.1	Análisis para el sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto	98
4.2.2	Análisis para el sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto.....	106
4.3	Análisis del impacto ambiental.....	112

4.3.1	Análisis para el sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto	113
4.3.2	Análisis para el sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto.....	118
4.4	Evaluación de los sistemas de metro duorriel tren ligero tipo viaducto por dovelas prefabricadas de concreto versus el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto	121
4.5	Análisis de sostenibilidad.....	124
4.5.1	Sostenibilidad económica.....	124
4.5.2	Sostenibilidad social.....	125
4.5.3	Sostenibilidad ambiental	126
4.6	Discusión de resultados.....	127
4.6.1	En los procesos constructivos:.....	127
4.6.2	En el ámbito económico:.....	128
4.6.3	En el ámbito ambiental:.....	130
CAPÍTULO 5.....		132
5.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	132
5.1	Conclusiones	132
5.2	Recomendaciones	133
BIBLIOGRAFÍA.....		134
6.	Bibliografía	134
PLANOS Y ANEXOS		142

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ASTM American Society for Testing and Materials

ACI American Concrete Institute

AASHTO American Association of State and Highway Transportation

MOP Ministerio de Obras Públicas

OMS Organización Mundial de la Salud

SIMBOLOGÍA

m	Metros
Km	Kilómetros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
mm	Milímetro
L	Longitud
Kg	Kilogramos
Ton	Toneladas
MPA	Mega Pascales
dB	Decibelios

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Gráfica representativa de los municipios de Monterrey.	16
Figura 2 Gráfica representativa de las nuevas líneas del metro de Monterrey.	19
Figura 3: Imagen representativa de vigas prefabricadas de concreto.....	20
Figura 4 Gráfica representativa en corte de la abscisa 1+500 de la línea 6 del metro de Monterrey.....	21
Figura 5: Imagen representativa del metro Monterrey Línea 1 en Av. Rodrigo Gómez.	22
Figura 6 Imagen representativa de la afectación de la construcción de la línea 3 del metro de Monterrey a la estética de los sectores comerciales.	22
Figura 7 Imagen representativa de la primera locomotora originaria de Inglaterra....	24
Figura 8 Gráfica representativa de las partes de un tren metro moderno.....	25
Figura 9: Gráfica representativa sistema de metro monorriel tipo horcajadas.	27
Figura 10 Gráfica representativa corte transversal sistema metro monorriel tipo horcajadas.	28
Figura 11 Gráfica representativa de un monorriel suspendido.	28
Figura 12 Esquema de sistema de desplazamiento de un monorriel suspendido.	29
Figura 13 Sección de un sistema de metro tren ligero sobre la superficie.....	30
Figura 14 Sistema de metro duorriel tren ligero elevado en la ciudad de Guadalajara.	31
Figura 15 Sección de viaducto para sistema de metro tren ligero elevado.....	32
Figura 16: Gráfica representativa del método de construcción Top-Down.	33
Figura 17:Gráfica representativa de una maquina tuneladora y sus funciones.	34
Figura 18 Izaje de vigas prefabricadas de concreto para el metro de Monterrey.	35
Figura 19 Gráfica representativa de las líneas del metro de Monterrey.....	37
Figura 20 Imagen representativa de las dovelas aplicadas en la superestructura de la línea 1 del metro de Monterrey.	38
Figura 21 Gráfica representativa de la sección trasversal de las dovelas aplicadas a la línea 1 del metro de Monterrey.	38

Figura 22 Gráfica representativa de la distribución de las estaciones de la línea 1 del metro de Monterrey.....	39
Figura 23 Estación Padre Mier de la línea 2 del metro de Monterrey.	40
Figura 24 Gráfica representativa sección túnel para metro subterráneo.	40
Figura 25 Gráfica representativa de la distribución de las estaciones de la línea 2 del metro de Monterrey.....	41
Figura 26 Imagen representativa de la línea 3 del metro de Monterrey.....	42
Figura 27 Imagen representativa sección transversal dovelas aplicadas a la línea 3 del metro de Monterrey.....	43
Figura 28 Gráfica representativa de la distribución de las estaciones de la línea 3 del metro de Monterrey.....	44
Figura 29 Gráfica representativa de las partes de una grúa hidráulica para izaje de puentes.	45
Figura 30 Gráfica representativa de las partes de un camión Mixer.....	46
Figura 31 Imagen representativa de las dimensiones de una bomba estacionaria de concreto.	47
Figura 32 Gráfica representativa de tipos de vibrador para concreto.	48
Figura 33 Imagen representativa de gato hidráulico multitorón tipo E.	49
Figura 34 Imagen representativa de gato hidráulico multitorón tipo T.	49
Figura 35 Imagen representativa de unidad de bombeo tipo E.	50
Figura 36 Imagen representativa de unidad de bombeo tipo T.....	51
Figura 37 Imagen representativa de insertadora de torones.	51
Figura 38 Imagen representativa de engargoladura de ductos para torones.....	52
Figura 39 Imagen representativa de inyectora de Grout.....	52
Figura 40 Gráfica representativa de un carro de avance para la construcción de un viaducto por voladizos sucesivos.....	53
Figura 41 Gráfica representativa de dovela prefabricada de concreto.....	56
Figura 42 Gráfica representativa del molde para fabricación de dovelas de concreto.	56
Figura 43 Gráfica representativa de los tipos de torones según su cantidad de cables.	57
Figura 44 Imagen representativa de anclaje tipo AS.	58

Figura 45 Imagen representativa de anclaje tipo AE.	59
Figura 46 Imagen representativa de anclaje tipo AR.	59
Figura 47 Imagen representativa de anclaje tipo PA.	59
Figura 48 Imagen representativa de anclaje tipo PC.	60
Figura 49 Imagen representativa de acopladores fijos.	60
Figura 50 Imagen representativa de acopladores móviles.....	61
Figura 51 Imagen representativa de ducto plástico para torones post-tensados.....	61
Figura 52 Imagen representativa de ducto metálico para torones post-tensados.....	62
Figura 53: Imagen representativa de una Viga de lanzamiento para viaducto por dovelas prefabricadas.....	63
Figura 54 Izaje de dovelas prefabricadas con grúa.	63
Figura 55 Gráfica representativa del proceso de anclaje para dovela “0”.....	65
Figura 56 Gráfica representativa de colocación de dovelas sucesivas.....	66
Figura 57 Gráfica representativa de la construcción de dovela de cierre con carro de avance.	67
Figura 58 Transporte de viga prefabricada de concreto para monorraíl 69	69
Figura 59 Grúas para izado de viga.....	69
Figura 60 Dispositivo de izado de viga para monorraíl 70	70
Figura 61 Secuencia de izado de viga para monorraíl.....	70
Figura 62 Gatos hidráulicos para ajuste viga para monorraíl.....	71
Figura 63 Tramo con junta intermedia colada en sitio.	72
Figura 64 Colocación de junta expansiva en juntas externas previo al colado.	72
Figura 65 Plano detalle de acero de refuerzo de placa superior y losa inferior para dovela prefabricada de concreto.....	99
Figura 66: Plano detalle de acero de refuerzo para tabiques de dovela prefabricada de concreto.	99
Figura 67 Gráfica de las dovelas prefabricadas utilizadas para la construcción de las líneas del metro de Monterrey.	103
Figura 68 Imagen representativa del área del bloque sólido de la dovela en AutoCAD.	104
Figura 69 Imagen representativa del área del hueco entre las dovelas.....	104
Figura 70 Imagen representativa del área del bloque de viga en AutoCAD.	110

Figura 71 Imagen representativa del área del poliestireno expandido de alta densidad en la viga prefabricada.....	110
Figura 72 Cantidad de ruido producido en diferentes líneas de la ciudad de México.	115
Figura 73 Cantidad de ruido producido en diferentes líneas de la ciudad de México.	116
Figura 74 Gráfica de los indicadores de sostenibilidad en un sistema de transporte urbano.....	124
Figura 75 Distribución demográfica de los municipios de Monterrey.	125
Figura 76 Distribución demográfica de los municipios de Monterrey.	126
Figura 77 Gráfica de los resultados de la evaluación 1.1 a los sistemas de metro..	127
Figura 78 Gráfica de los resultados de la evaluación 1.2 a los sistemas de metro..	127
Figura 79 Gráfica de los resultados de la evaluación 1.3 a los sistemas de metro..	128
Figura 80 Gráfica de los resultados de la evaluación 2.1 a los sistemas de metro..	128
Figura 81 Gráfica de los resultados de la evaluación 2.2 a los sistemas de metro..	129
Figura 82 Gráfica de los resultados de la evaluación 2.3 a los sistemas de metro..	129
Figura 83 Gráfica de los resultados de la evaluación 3.1 a los sistemas de metro..	130
Figura 84 Gráfica de los resultados de la evaluación 3.2 a los sistemas de metro..	130
Figura 85 Gráfica de los resultados de la evaluación 3.3 a los sistemas de metro..	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de los límites permisibles de partículas suspendidas en el aire para la ciudad de Monterrey.	18
Tabla 2 Orígenes y destinos de las nuevas líneas del metro de Monterrey con sus respectivas coordenadas y Municipios.	19
Tabla 3 Clases y usos de cemento Portland para estructuras.	54
Tabla 4 Diámetros de varillas corrugadas para refuerzo de hormigón.	55
Tabla 5 Tabla comparativa para los procesos constructivos de los casos de estudio	84
Tabla 6 Criterio de puntaje para los procesos constructivos.	85
Tabla 7 Criterio de puntaje para el ámbito económico.	86
Tabla 8 Criterio de puntaje para el impacto ambiental.	87
Tabla 9 Equipos a utilizar en los procesos de postensado para la superestructura de un sistema duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas.	90
Tabla 10 Equipos a utilizar en el colado de hormigón para la superestructura de un sistema duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas.	91
Tabla 11 Materiales a implementarse en los procesos de postensado para la superestructura de un sistema duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto	92
Tabla 12 Equipos para los procesos de postensado en la superestructura de un sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto.	94
Tabla 13 Equipos a utilizar en el colado de hormigón para la superestructura de un sistema duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas.	95
Tabla 14 Materiales para los procesos de postensado a implementarse en la superestructura de un sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto	97
Tabla 15 Tabla de cálculo de acero de refuerzo longitudinal para placa superior de dovela prefabricada de concreto.	100
Tabla 16 Tabla de cálculo de acero de refuerzo transversal para placa superior de dovela prefabricada de concreto.	100

Tabla 17 Tabla de cálculo de acero de refuerzo longitudinal para losa inferior de dovela prefabricada de concreto.	101
Tabla 18 Tabla de cálculo de acero de refuerzo transversal para losa inferior de dovela prefabricada de concreto.	101
Tabla 19 Tabla de cálculo de acero de refuerzo longitudinal para tabiques de dovela prefabricada de concreto.	102
Tabla 20 Tabla de cálculo de acero de refuerzo transversal para tabiques de dovela prefabricada de concreto.	102
Tabla 21 Acero de refuerzo longitudinal de la viga prefabricada de concreto para monorriel.	107
Tabla 22 Acero de refuerzo transversal sección 6 viga de monorriel.	108
Tabla 23 Acero de refuerzo transversal sección 3 viga de monorriel.	108
Tabla 24 Acero de refuerzo transversal sección 2 viga de monorriel.	108
Tabla 25 Tabla comparativa sistemas de metro	122

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 PLANO DOVELA PREFABRICADA DE CONCRETO

PLANO 2 PLANO VIGA PREFABRICADA DE CONCRETO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la ciudad de Monterrey se está llevando a cabo la construcción de nuevas líneas de metro debido a la gran demanda de movilidad que existe en la ciudad. La última línea de metro denominada la línea 3 fue inaugurada en el año 2021 con una población de 5.3 millones de habitantes (EL HERALDO MEXICO, 2021). En la actualidad, la ciudad de Monterrey cuenta con 5.7 millones de habitantes (INEGI, 2023), dando una necesidad de movilidad de más de cuatrocientas mil personas en las nuevas zonas periféricas del área metropolitana. Este nuevo proyecto cubrirá la demanda de movilidad en la periferia de la ciudad en los municipios de Santa Catarina, San Pedro, Monterrey, Guadalupe, Juárez, Apodaca y Santiago.



Figura 1 Gráfica representativa de los municipios de Monterrey.

Fuente: (Alcaldes de Mexico, 2022).

Las nuevas líneas del metro requieren ser construidas bajo un mejor sistema en relación a las líneas anteriores, esta mejora va tanto en sus materiales, estética y procesos constructivos ya que se desea evitar los antiguos problemas que se presentaron en la construcción de las líneas anteriores.

Las anteriores líneas de metro fueron construidas bajo los sistemas duorriel tipo viaducto suspendido y subterráneo los cuales han sido métodos convencionales para la construcción de metros, estos métodos convencionales incluyen la utilización de dovelas prefabricadas de concreto y la realización de túneles subterráneos respectivamente para cada sistema. Debido a esto, los principales problemas que se presentaron por la implementación de estos métodos fueron el congestionamiento vehicular y la afectación a la estética de las zonas comerciales por donde pasa las existentes líneas de metro.

El tráfico de Monterrey se sitúa en el noveno lugar de las ciudades con mayor congestionamiento vehicular a nivel mundial (Huerta, 2023), por este motivo cualquier intervención de construcción sobre las vías incrementaría el problema de congestionamiento en la ciudad; por lo cual, se ve la necesidad de buscar un método de construcción más rápido, menos intrusivo para el espacio constructivo y evitar el cierre del flujo de tráfico puesto que las nuevas líneas de metro están previstas que pasen por las vías principales de la ciudad.

También las nuevas líneas del metro al transcurrir por las vías principales de la ciudad se debe cuidar la estética del lugar ya que estas vías en su mayoría están bordeadas por zonas comerciales lo cual si no se toma en cuenta este aspecto afectaría al comercio de las zonas.

Una necesidad en la construcción de las nuevas líneas del metro de Monterrey es la reducción de producción de las partículas PM10 y las PM2.5 por la explotación de las canteras para producción de hormigón. Las partículas PM10 son partículas cuyo diámetro va de 10 a 2.5 micrones y las PM2.5 son partículas cuyo diámetro va de 2.5 micrones a inferiores, estas partículas al estar suspendidas en el aire ingresan al sistema humano causando problemas cardiovasculares y respiratorios (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

Tabla 1 Tabla de los límites permisibles de partículas suspendidas en el aire para la ciudad de Monterrey.

Norma Mexicana	Oficial	Contaminante	Límite Máximo Permissible			
			Promedio móvil de 8 h 1 vez al año	Promedio anual	Promedio de 24 h	Promedio 1 h una vez al año
NOM-025-SSA1-2014		PM ₁₀	----	40 µg/m ³	75 µg/m ³	----
NOM-025-SSA1-2014		PM _{2.5}	----	12 µg/m ³	45 µg/m ³	----
NOM-020-SSA1-2014		Ozono	0.070 ppm	----	0.095 ppm	----

Fuente: (Blanco Jiménez & Altúzar Villatoro, 2015).

Monterrey según un estudio realizado por la OMS revelo que los niveles de PM10 eran de 58 micro gramos por metro cúbico y PM2.5 de 27 microgramos por metro cúbico en el aire (Valor Compartido, 2022). Una de las causas principales de estos elevados niveles de contaminación se debe a las pedreras las cuales al explotar su materia prima emiten estas partículas en el aire causando que en el año 2022 el 71% de los días sean de mala calidad de aire (González Manrique, 2023).

1.2 Localización

El proyecto se llevará a cabo en la ciudad de Monterrey-México donde las nuevas líneas a implementarse cubrirán las zonas sur, este y oeste de la ciudad. A continuación, se presenta un bosquejo del recorrido de las nuevas líneas.

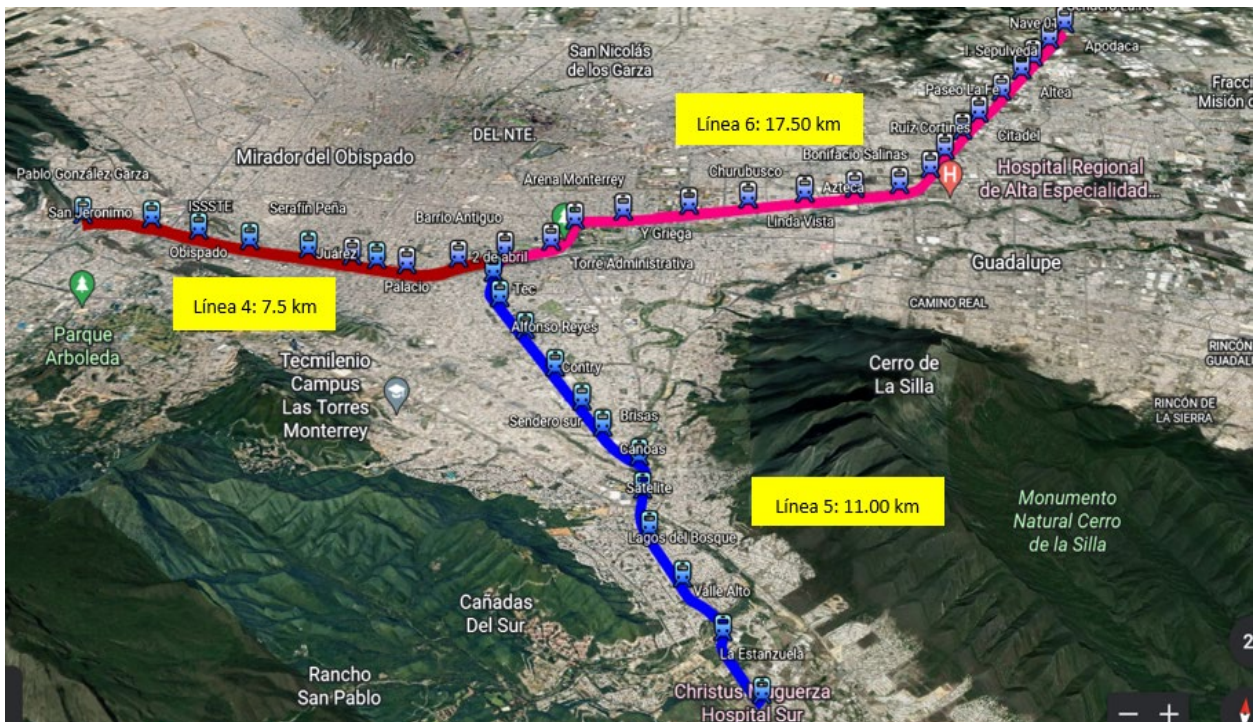


Figura 2 Gráfica representativa de las nuevas líneas del metro de Monterrey.

Fuente: Google Earth.

Las nuevas líneas del metro se dividen en 3 líneas las cuales intersectan en el municipio de Monterrey en el hospital de ginecología al igual que las líneas anteriores.

Línea 4: Origen en San Jerónimo; destino el Hospital de ginecología.

Línea 5: Origen en La Estanzuela; destino el Hospital de ginecología.

Línea 6: Origen en el pueblo de Apodaca; destino el Hospital de ginecología.

Como origen se refiere al lugar donde van a ser implantadas las estaciones de cada línea las cuales presentan las siguientes coordenadas:

Tabla 2 Orígenes y destinos de las nuevas líneas del metro de Monterrey con sus respectivas coordenadas y Municipios.

LINEAS METRO	ORIGEN	COORDENADAS		MUNICIPIO	DESTINO	COORDENADAS		MUNICIPIO
		NORTE	OESTE			NORTE	OESTE	
Línea 4	San Jerónimo	25°40'24.94"	100°22'7.54"	Santa Catarina	Hospital Ginecológico	25°40'9.91"	100°17'47.22"	Monterrey
Línea 5	La Estanzuela	25°35'0.31"	100°15'17.94"	Santiago	Hospital Ginecológico	25°40'9.91"	100°17'47.22"	Monterrey
Línea 6	Pueblo Apodaca	25°46'30.30"	100°11'13.37"	Apodaca	Hospital Ginecológico	25°40'9.91"	100°17'47.22"	Monterrey

Fuente: Elaboración propia.

1.3 Justificación

Los sistemas de metro han sido una solución para el transporte público de habitantes de una ciudad desde el año 1863 con su invención en Londres (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2023), estos sistemas cuentan con vías exclusivas para su movilidad y libre circulación sin interferencias tales como el tráfico de vehículos y la circulación de personas. El principal objetivo de un sistema de metro es intervenir en las zonas de mayor concentración de habitantes y llevarlas a diferentes puntos estratégicos de la ciudad con el fin de disminuir el congestionamiento de vehículos.

Monterrey desde el año 1991 ya contaba con su primera línea de metro (METRORREY, 2023) el cual obtuvo resultados satisfactorios para la época, ya que este se presentó como un método novedoso y vanguardista para solucionar los problemas de movilidad de la gente. Sin embargo, en el presente se necesita hacer énfasis a las demandas actuales que requiere un metro para su implementación en la ciudad; tales como el

impacto a la imagen urbana, la emisión de contaminación al aire por los procesos constructivos y el impacto al tráfico debido también a su construcción, convirtiéndose así, todos estos aspectos en puntos muy importantes para el diseño de las nuevas líneas.

Monterrey al ser una ciudad de alta producción industrial y comercial (Tapia Ramírez, Rubi, 2020) no puede interrumpir ni parar la circulación vehicular ya que si esto ocurre daría una afectación a la economía, por lo tanto, una solución viable para este inconveniente es el uso de elementos prefabricados para la estructura del metro. Los elementos prefabricados son de gran utilidad en la construcción ya que se evitaría construir los de elementos estructurales de gran tamaño en sitio, estos elementos prefabricados suelen ser en su mayoría de aleaciones de acero o de concreto armado. En las nuevas líneas del metro por motivos de costos se optó por utilizar elementos prefabricados de concreto ya que estos son más económicos.



Figura 3: Imagen representativa de vigas prefabricadas de concreto.

Fuente: (PREFAMOVIL, 2022).

El método de utilizar elementos prefabricados de concreto fue implementado en los sistemas convencionales de las anteriores líneas del metro, ya que, fueron construidas por el sistema tipo viaducto suspendido por dovelas sucesivas prefabricadas. Para mejorar el sistema de dovelas sucesivas prefabricadas se planteó cambiar el sistema constructivo por un sistema nuevo denominado tipo monorriel el cual con su diseño

ocupa menos volumen de concreto en la superestructura ofreciendo una reducción de costos, tiempo e impacto al medio ambiente.

El espacio por donde se realiza la construcción de las nuevas líneas del metro es de suma importancia, ya que estas atraviesan zonas urbanas llegando a espacios disponibles de construcción de máximo 9 metros de ancho, por lo que el sistema propuesto tipo monorriel se ajusta perfectamente a esta necesidad, ya que las vigas para el monorriel ocupan menos espacio que las dovelas de concreto.

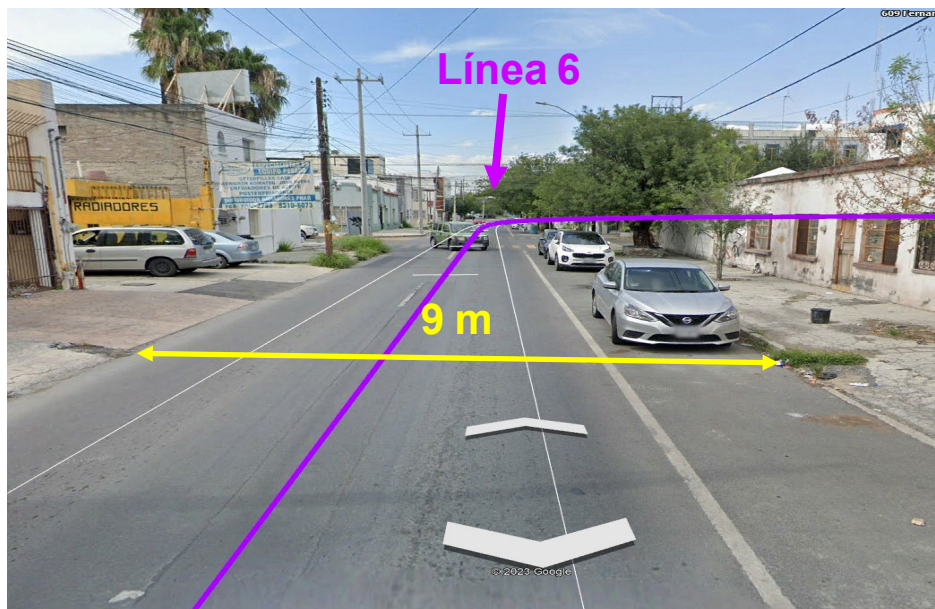


Figura 4 Gráfica representativa en corte de la abscisa 1+500 de la línea 6 del metro de Monterrey.

Fuente: Google Earth.

Otro problema que se presentó en la anterior línea del metro fue el impacto a la imagen urbana por la intrusión visual (Oró Quixal, 2005), esto se debió ya que el resultado final de la construcción de los viaductos suspendidos por dovelas son grandes plataformas de concreto tipo superestructura de puente, esto provoca un bloqueo a la imagen de los sectores dándole una apariencia suburbana lo cual produce una disminución en la plusvalía de las propiedades tanto residenciales como comerciales (DIARIO EL NORTE, 2013).



Figura 5: Imagen representativa del metro Monterrey Línea 1 en Av. Rodrigo Gómez.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6 Imagen representativa de la afectación de la construcción de la línea 3 del metro de Monterrey a la estética de los sectores comerciales.

Fuente: Google Maps.

El sistema de metro tipo monorriel se adapta perfectamente a la solución de este problema debido a que el sistema constructivo es menos invasivo y requiere un menor periodo de tiempo de construcción que el convencional. Además, que el sistema tipo monorriel reemplaza la superestructura tipo puente por dos vigas prefabricadas de concreto, permitiendo el paso de la luz logrando una disminución en la afectación a la estética de las zonas a intervenir.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

Evaluar el sistema constructivo de vigas prefabricadas de concreto armado monorriel en comparación con el sistema duorriel, para la determinación del cual proceso es el óptimo para la ciudad de Monterrey, mediante el análisis de sus procesos constructivos, materiales de construcción, tiempo de implementación, entre otros factores.

1.4.2 Objetivos Específicos.

1. Definir los distintos sistemas constructivos empleados en las líneas 1,2 y 3 del metro de Monterrey, para la determinación de mejoras en el sistema de metro de la ciudad.
2. Comparar el sistema constructivo de la superestructura con vigas de concreto armado prefabricadas para monorriel con el sistema duorriel empleado en el metro de monterrey, mediante el análisis de sus procesos constructivos, materiales, tiempo de implementación, evaluación ambiental entre otros factores.
3. Recomendar cual es el sistema constructivo óptimo para ser implementado en las nuevas líneas del metro de la ciudad de Monterrey, mediante el análisis de los beneficios de cada sistema estudiado en el presente documento.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Sistemas ferroviarios

Los sistemas ferroviarios son una de las formas más antiguas y eficientes de transporte. Desde su invención en la década de 1800 (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2023), los trenes han sido utilizados en todo el mundo para conectar ciudades, países y hasta continentes. La historia de los sistemas ferroviarios se remonta a principios del siglo XIX, cuando los primeros trenes comenzaron a operar en Inglaterra. Estos primeros trenes eran impulsados por vapor y se utilizaron principalmente para transportar carbón de las minas a los puertos (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2023). Sin embargo, pronto se descubrió que los trenes también podían ser utilizados para transportar pasajeros y mercancías a través de largas distancias.

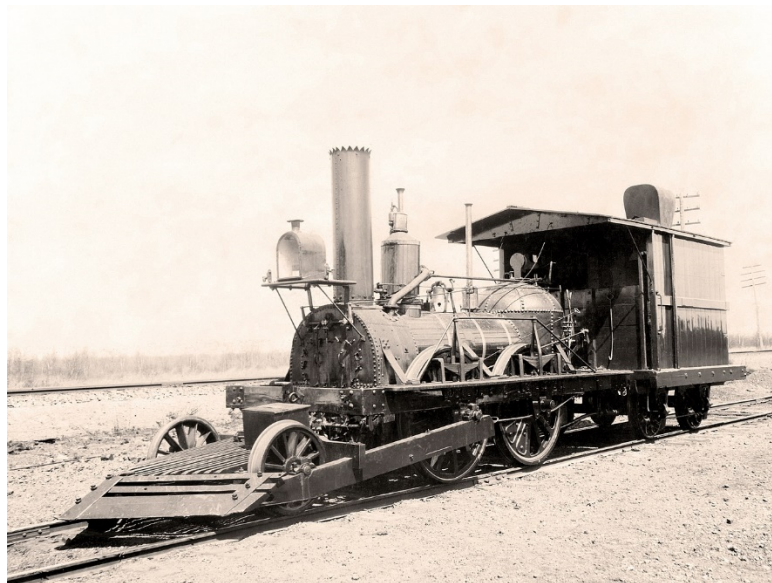


Figura 7 Imagen representativa de la primera locomotora originaria de Inglaterra.

Fuente: (ROBERT STEPHENSON AND COMPANY, 2023).

A medida que se desarrollaba la tecnología del ferrocarril estos se fueron construyendo en todo el mundo. En Europa los sistemas ferroviarios se convirtieron en una forma importante de transporte de pasajeros y carga conectando no solamente ciudades sino también países (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2023), mientras que en el

continente americano significo la expansión de la civilización de este a oeste del continente.

En la actualidad, los sistemas ferroviarios siguen siendo una forma importante de transporte, aunque en gran parte han sido reemplazados por automóviles y aviones para viajes de larga distancia, aun así, los trenes siguen siendo utilizados para transportar mercancías y pasajeros en muchas partes del mundo. En los países desarrollados los sistemas ferroviarios se han modernizado con trenes de alta velocidad y tecnología de punta, lo que los hace aún más eficientes y rentables (Sánchez Rosales & Toledo Días, 2020).

El funcionamiento de un sistema de tren es relativamente simple. Los trenes son impulsados por motores eléctricos, a diésel o a vapor para poder dar potencia a sus ruedas que se deslizan sobre rieles, gracias a esto, los trenes pueden viajar a velocidades muy altas y también son capaces de transportar grandes cargas.

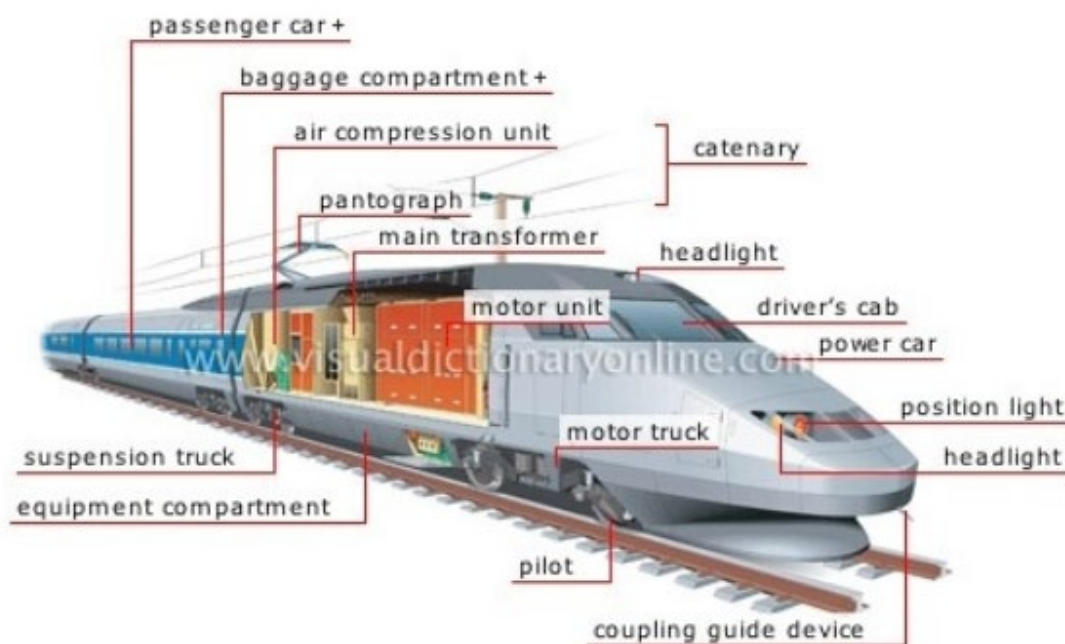


Figura 8 Gráfica representativa de las partes de un tren metro moderno.

Fuente: (TraduNET, 2023).

Los trenes son de mucha utilidad en México ya que es el sistema de transporte público preferido por su población. En México se usan estos sistemas ferroviarios para transportar gente dentro de las principales ciudades, comunicando lugares importantes y de gran concentración poblacional como son las zonas industriales con zonas urbanas

o también las zonas turísticas con las comerciales. Los trenes que transportan pasajeros se los denomina metro los cuales se pueden construir de diferentes sistemas como por ejemplo los convencionales ya utilizados en ciudades como México D.F, Monterrey y Guadalajara.

El método convencional de metro que se ha usado en México es del tipo duorriel o tren ligero, este método se basa en la implementación de vías exclusivas de tren sin interferencias donde el tren se desliza sobre dos rieles de acero y atraviesan la ciudad por los sistemas tipo viaducto suspendido o subterráneo. En la ciudad de Monterrey se ha apostado por un nuevo sistema de metro denominado monorriel, el cual promete mejorar al sistema convencional ya mencionado anteriormente.

2.2 Sistema de metro tipo Monorriel

El metro tipo monorriel es un sistema de transporte de pasajeros que se caracteriza por tener una sola vía elevada por la cual circulan los trenes que están suspendidos por encima del suelo mediante una estructura de soporte.

Una de las principales ventajas del metro tipo monorriel es que ocupa muy poco espacio en la superficie, ya que la vía elevada se sostiene en columnas que se ubican en el medio de las calles o a lo largo de vías férreas existentes. De esta manera, no es necesario despejar grandes áreas de terreno para la construcción del sistema, lo que puede reducir significativamente los costos y los tiempos de construcción.

Otra ventaja del metro tipo monorriel es su capacidad para superar obstáculos en el terreno como ríos, zonas pantanosas o terrenos montañosos debido a que los trenes circulan por encima del suelo, esto les permite sortear fácilmente obstáculos sin tener que construir puentes o túneles costosos y complicados.

El metro tipo monorriel ofrece una vista panorámica de la ciudad a los pasajeros, lo que puede ser una experiencia atractiva y única. Los trenes pueden ofrecer una vista inigualable de los monumentos y edificios más emblemáticos de la ciudad, lo que puede convertir el viaje en una atracción turística.

Este sistema de metro es utilizado en ciudades de todo el mundo, especialmente en aquellas con terrenos complicados o con densidades de población muy altas. Este sistema de metro se diferencia principalmente en que solo se usa para transportar personas y en su superestructura se reemplaza el viaducto del sistema convencional por

vigas de concreto. Los sistemas de metro tipo monorriel pueden ser suspendidos o de horcajadas (Gobierno de México, 2023).

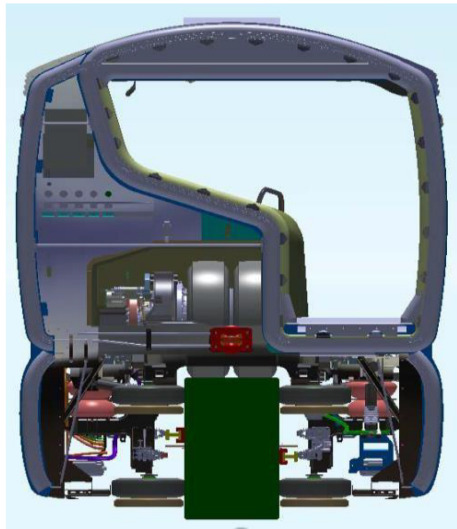
2.2.1 Sistema de metro tipo Monorriel Horcajadas

El sistema de metro tipo monorriel de horcajadas también se lo conoce como monorriel sobre viga, este tipo de monorriel es el más común, donde, el tren se apoya sobre una viga de concreto armado de máximo 1 metro de ancho. Este apoyo se da gracias a que el metro utiliza neumáticos de caucho los cuales se adhieren arriba y lateralmente a la viga de concreto para darle estabilidad (Gobierno de México, 2023).



Figura 9: Gráfica representativa sistema de metro monorriel tipo horcajadas.

Fuente: (Reyes, 2022).



❑ 6-cars train configuration

- > Vehicle L*W*H: 13.2(11.8)*3.15*4.53m
- > Roof to top of running surface: 3019mm
- > Floor to top of running surface: 450mm
- > Doors: 2/side, 1600*1930mm
- > Axle load: 14 t
- > Max slope: 6%(Mainline) 10%(Depot)
- > Min curve: 70m(Mainline) 46m(Depot)
- > Operation speed: 80km/h
- > Starting acceleration: 1.1m/s²
- > Normal brake deceleration: 1.2m/s²
- > Power distribution: DC750V
- > Passenger capacity:

end car	middle car
@5P/m ²	116 124
@8P/m ²	176 189

Figura 10 Gráfica representativa corte transversal sistema metro monorriel tipo horcajadas.

Fuente: MotaEngil-México

2.2.2 Sistema de metro tipo Monorriel Suspendido

Los monorrieles tipo suspendidos son tipos de metro los cuales el tren va suspendido de una viga metálica, donde, las ruedas del tren se incrustan en medio de la viga metálica. A diferencia del monorriel sobre viga, este sistema de monorriel es más costoso ya que se requiere mayor utilización de acero para su construcción (Gobierno de México, 2023).



Figura 11 Gráfica representativa de un monorriel suspendido.

Fuente: MotaEngil-México.

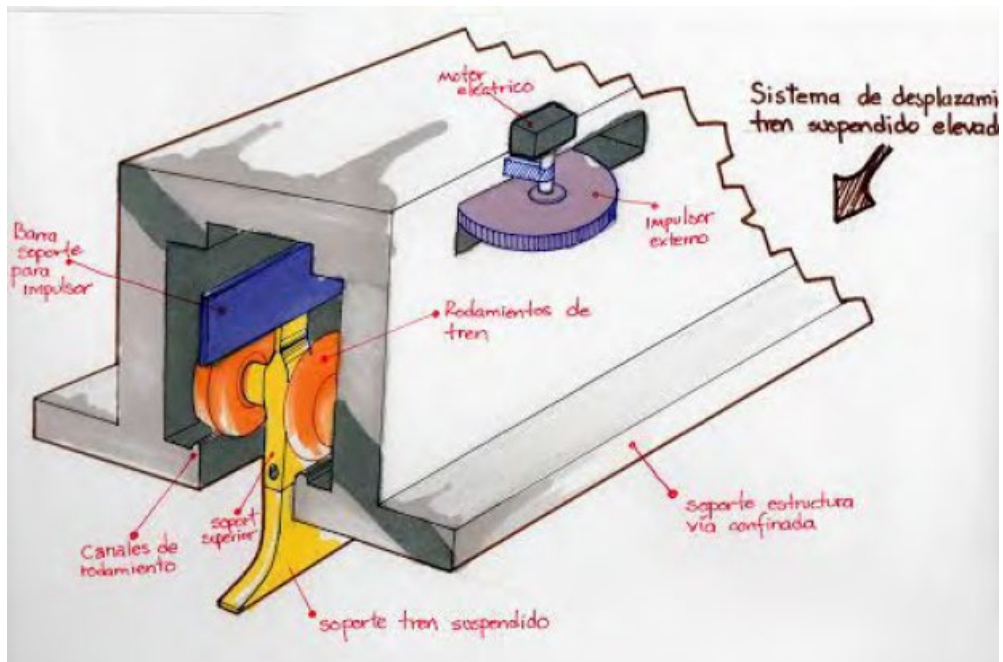


Figura 12 Esquema de sistema de desplazamiento de un monorraíl suspendido.

Fuente: (Vargas Luna, 2015).

2.3 Sistema de metro Duorraíl o Tren Ligero

El sistema de metro tipo duorraíl también se lo conoce como tren ligero, este es un sistema de transporte que se caracteriza porque puede ser constituido por una vía en la superficie, una vía elevada o una subterránea, a diferencia del metro tipo monorraíl que se limita a tener una vía elevada. Este sistema de transporte se utiliza en ciudades de todo el mundo y es una opción popular para conectar los suburbios con el centro de la ciudad (Gobierno de México, 2023).

2.3.1 Sistema de metro Tren Ligero sobre la superficie

Los trenes ligeros que funcionan sobre la superficie pueden circular en una vía exclusiva ya sea al costado de una carretera donde en algunos puntos se interceptan en cruces con el tráfico vehicular, o también, pueden usar un carril compartido en la vía con el tráfico vehicular.

El metro tipo tren ligero sobre la superficie puede ser una opción más flexible que otros sistemas de transporte ya que pueden compartir la vía con otros vehículos y se pueden combinar con más rutas y paradas que otros sistemas de transporte. Esto puede hacer

que el sistema sea más conveniente para los pasajeros y más adaptativo a las necesidades cambiantes de la ciudad.

El tren ligero sobre la superficie se asienta sobre rieles los cuales están sujetos a durmientes que transmiten la carga a una terracería de diferentes capas de suelo según el diseño lo requiera. Este tipo de metro por lo general es impulsado por electricidad la cual es suministrada al metro por medio de postes catenarias (Acón García, 2018).

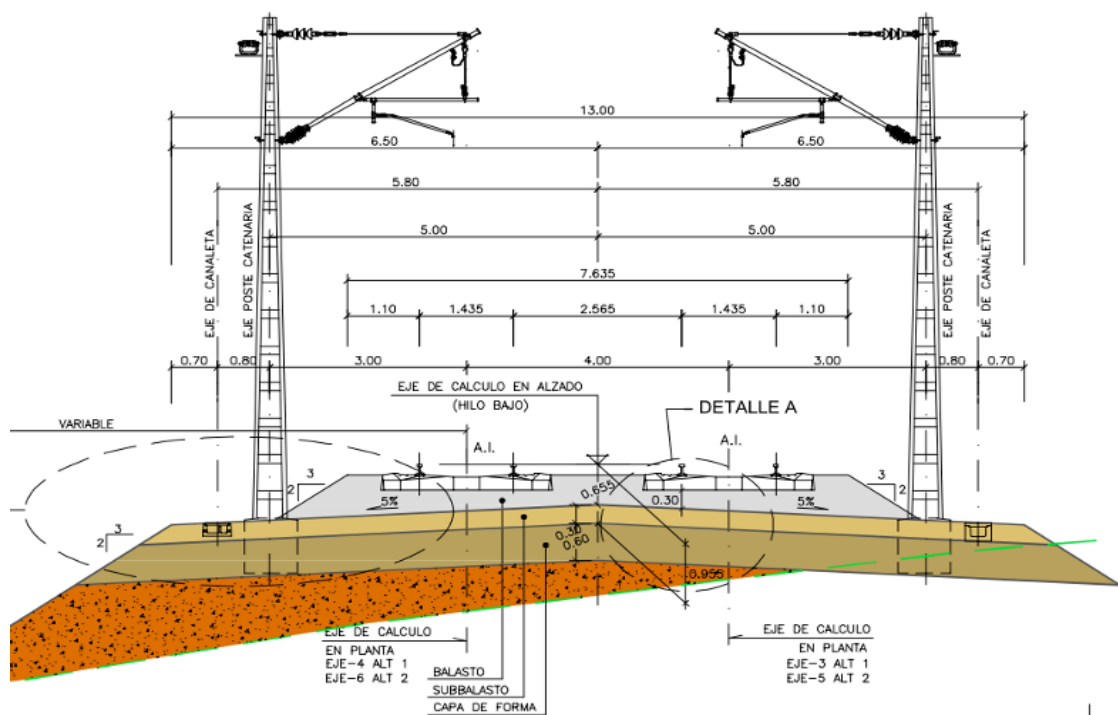


Figura 13 Sección de un sistema de metro tren ligero sobre la superficie.

Fuente: (Acón García, 2018).

Sin embargo, el metro tipo tren ligero sobre la superficie también tiene algunas desventajas. Una de ellas es que puede ser menos eficiente que otros sistemas de transporte en términos de velocidad y capacidad de pasajeros.

Debido a que los trenes ligeros circulan en la superficie y pueden compartir la vía con otros vehículos, pueden verse afectados por el tráfico y las interrupciones en la vía. Además, debido a que los trenes ligeros son más pequeños que los trenes de otros sistemas de transporte, pueden tener una capacidad de pasajeros menor.

2.3.2 Sistema de metro Tren Ligero elevado.

El sistema de metro tipo tren ligero elevado se caracteriza por tener una vía exclusiva para su circulación, esta vía atraviesa las zonas por medio de un viaducto, el cual, se construye de igual manera que un puente por dovelas sucesivas. Las dovelas se juntan entre sí por medio de torones para simular un tablero por donde pasará el tren.

Una de las principales ventajas del metro tipo tren ligero elevado es que puede cubrir una distancia mayor que otros sistemas de transporte debido a que los trenes ligeros se mueven a velocidades más altas en una vía dedicada, por lo que, pueden cubrir grandes distancias en un tiempo más corto. Esto hace que sea una opción atractiva para conectar las ciudades o para viajes interurbanos.

Una desventaja del metro tipo tren ligero elevado es que puede tener un costo más elevado que otros sistemas de transporte de superficie. La construcción de una vía dedicada puede ser costosa, especialmente si se requiere la adquisición de terrenos nuevos o si se necesita construir un túnel o un puente para cruzar obstáculos. Esto puede hacer que el costo del sistema sea prohibitivo para algunos gobiernos locales o empresas privadas.



Figura 14 Sistema de metro duorriel tren ligero elevado en la ciudad de Guadalajara.

Fuente: (EL OCCIDENTAL, 2022).

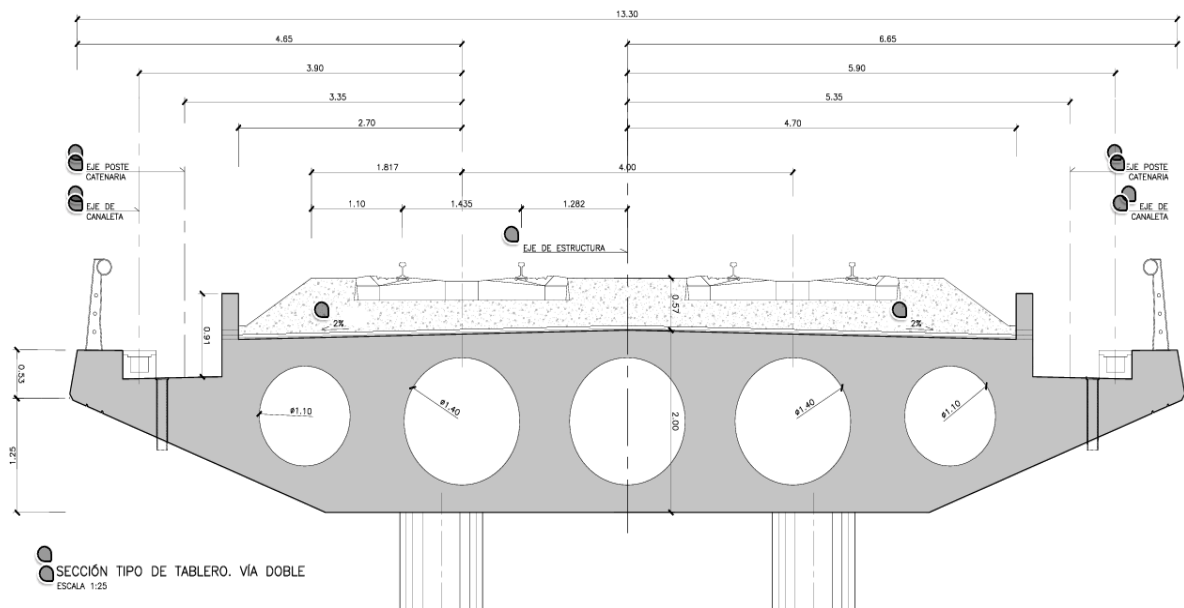


Figura 15 Sección de viaducto para sistema de metro tren ligero elevado.

Fuente: (Acón García, 2018).

2.3.3 Sistema de metro Tren Ligero subterráneo

El sistema de metro tren ligero subterráneo es un sistema de metro el cual se desarrolla mediante construcción de túneles y estaciones bajo el suelo. Este sistema de metro se emplea principalmente para no afectar ni alterar la superficie. Por lo general se aplica este método cuando la alteración de la superficie supera los costos de la construcción del túnel. O también, cuando se desea preservar patrimonio invaluable. Para la construcción de las estaciones se emplea el método constructivo denominado top-down y para los túneles se emplea el método constructivo denominado “cut and cover”.

2.3.3.1 Método constructivo “top-down”

El método top-down es un método constructivo que se basa en la implementación de pilotes en el área donde se desea construir, donde, estos pilotes al llegar a la profundidad deseada actuarán también como columnas para la estructura de las estaciones. Una vez realizado todos los pilotes se procede a construir la plataforma de cobertura sobre estos lo cual consolidada a la estructura y se procede a excavar por niveles hasta llegar a la profundidad determinada. Una vez terminado de excavar un nivel se procede

a construir las vigas y la losa que actuarán como cobertura del siguiente nivel, este proceso se repite para todos los niveles. Y por último, al llegar al nivel final se procede a construir la cimentación de la estación según lo determine el diseño (Chiri Reyes, Mendoza Carreño, & Poma Ancasí, 2019).

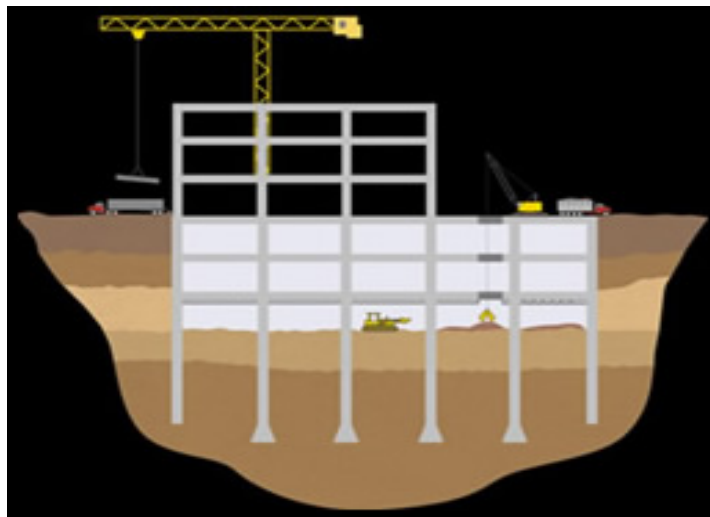


Figura 16: Gráfica representativa del método de construcción Top-Down.

Fuente: (EDIFICA, 2011).

2.3.3.2 Método constructivo “cut and cover”

El método constructivo “cut and cover” es el método que se aplica para la construcción de túneles realizado mediante una máquina denominada tuneladora.

La máquina tuneladora cumple tres funciones la cual es excavar, retirar el material de escombros y luego revestir las paredes del túnel anclando placas prefabricadas de concreto. Una máquina tuneladora es una herramienta especializada diseñada para excavar túneles de forma continua con un promedio de avance entre 100 y 150 metros por semana (Heredia Navarro, 2015). La tuneladora está compuesta por los siguientes componentes principales:

- a. Cabezal de Corte: Es la parte frontal de la máquina que realiza la excavación. Está equipado con discos de corte, herramientas de corte o dientes de corte que desmenuzan el suelo o la roca a medida que avanza. Puede estar diseñado para adaptarse a diferentes condiciones geológicas, como terrenos blandos, roca dura o mezclas de suelo y roca (Heredia Navarro, 2015).
- b. Escudo o Cápsula: Es la estructura que rodea el cabezal de corte y proporciona soporte a medida que avanza la excavación. Puede estar presurizado para equilibrar las

presiones del suelo circundante y prevenir el colapso del frente de excavación (Heredia Navarro, 2015).

c. Transportador de Materiales: Una vez que el cabezal de corte desmenuza el suelo o la roca, los materiales excavados se transportan a través de un transportador ubicado en el interior de la máquina. Este transportador puede ser de cinta transportadora o de tornillo sin fin, y su función es extraer los materiales y llevarlos fuera del túnel (Heredia Navarro, 2015).

d. Sistema de Apuntalamiento o Revestimiento: A medida que avanza la máquina tuneladora, se instalan anillos de revestimiento de concreto en el túnel excavado para proporcionar estabilidad y prevenir el colapso del terreno. Estos anillos pueden estar compuestos de hormigón prefabricado, acero o una combinación de ambos (Heredia Navarro, 2015).

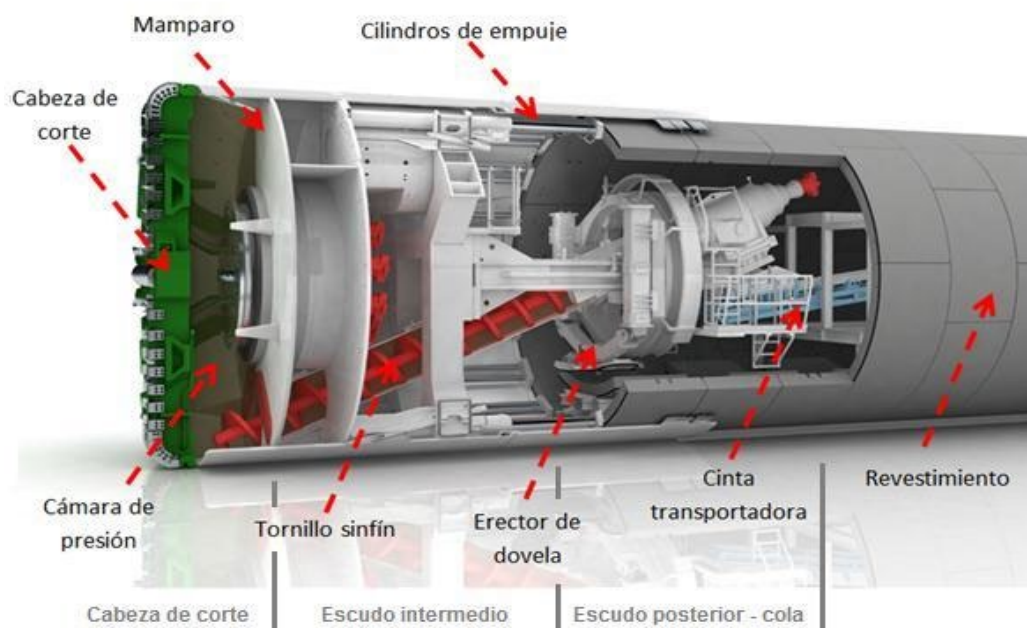


Figura 17: Gráfica representativa de una máquina tuneladora y sus funciones.

Fuente: (Pozo Rojas & Ochoa Cornejo, 2016).

2.4 Sistema de elementos prefabricados de concreto en la construcción de ferrocarriles

En la construcción de ferrocarriles, los elementos prefabricados de concreto son una solución eficiente y sostenible que ha ganado popularidad en los últimos años. Los elementos prefabricados de concreto son estructuras que se fabrican en una fábrica y se

transportan al sitio de la construcción para su instalación. Estos elementos pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones en la construcción de ferrocarriles, como puentes, estaciones de tren, muros de contención, plataformas entre otros.



Figura 18 Izaje de vigas prefabricadas de concreto para el metro de Monterrey.

Fuente: MotaEngil-México.

Una de las principales ventajas de los elementos prefabricados de concreto es su rapidez de instalación. Al estar fabricados previamente pueden ser entregados al sitio de construcción en un plazo más corto que si se construyeran in situ. Además, al ser elementos estándar, su diseño y fabricación se realizan bajo normas de calidad rigurosas lo que garantiza la consistencia y uniformidad en su instalación.

Otra ventaja de los elementos prefabricados de concreto es su durabilidad y resistencia debido a que el concreto es un material que puede soportar grandes cargas y resistir la intemperie y otros elementos que puedan dañar los materiales de construcción. Además, los elementos prefabricados de concreto pueden ser reutilizados o reciclados en caso de que se requiera su desmantelamiento en el futuro.

Los elementos prefabricados de concreto también son una solución sostenible en la construcción de ferrocarriles. Al ser fabricados previamente en una fábrica, se reduce la cantidad de residuos y desperdicios en el sitio de construcción. Los elementos

prefabricados de concreto son una solución eficiente, duradera y sostenible en la construcción de ferrocarriles. A pesar de que tienen algunas desventajas, su rapidez de instalación, durabilidad y sostenibilidad los hacen una opción atractiva para la construcción de ferrocarriles en todo el mundo.

2.5 Sistemas de metro aplicado en la ciudad de Monterrey, líneas 1, 2 y 3

El Metro de Monterrey es uno de los sistemas de transporte público más importantes de la ciudad, ya que ofrece a los habitantes una opción rápida y eficiente para desplazarse de un lugar a otro sin tener que lidiar con el tráfico y la congestión vehicular. A continuación, se analizarán los aspectos más relevantes del metro de Monterrey y su impacto en la ciudad.

En primer lugar, es importante destacar la historia del Metro de Monterrey, ya que fue inaugurado en 1991 como una respuesta a la creciente demanda de transporte público en la ciudad (INEGI, 2023). Desde entonces, el metro ha evolucionado y se ha expandido, convirtiéndose en un elemento clave de la infraestructura urbana de Monterrey. En la actualidad, el metro cuenta con tres líneas que conectan varias zonas de la ciudad y transportan a más de 300 mil personas al día (INEGI, 2023).

El metro es una opción de transporte público que produce muy pocas emisiones de carbono y es una alternativa más sostenible y ecológica que los vehículos privados. Además, al reducir la cantidad de coches en las carreteras y calles de la ciudad, el metro contribuye a reducir la contaminación acústica y del aire, mejorando la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

El metro de Monterrey también ha tenido un impacto significativo en la economía local, ya que ha contribuido a fomentar el desarrollo urbano y a atraer inversión a la ciudad. Muchas empresas han establecido sus oficinas y fábricas cerca de las estaciones del metro, lo que ha impulsado la economía local y ha creado empleos para los habitantes de la ciudad. A continuación, se presenta una gráfica de las líneas del metro de Monterrey.

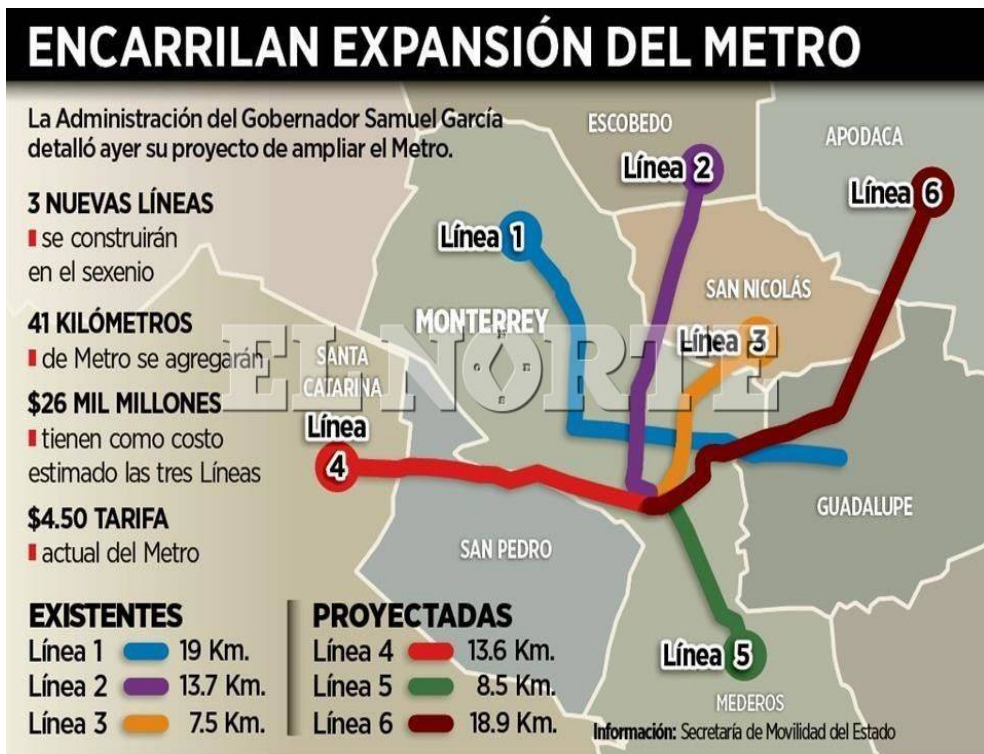


Figura 19 Gráfica representativa de las líneas del metro de Monterrey

Fuente: Secretaria de Movilidad del Estado de Nuevo León.

2.5.1 Metro de Monterrey línea 1

La línea 1 del metro de Monterrey es la más antigua se inauguró en el 1991 y posee una extensión de 19 km, desde la estación Talleres hasta la estación Exposición. Cuenta con un total de 19 estaciones, cada una con su propia personalidad y características.

La línea 1 es un sistema de metro tipo combinado, este en su mayor longitud posee un sistema tipo viaducto suspendido el cual está construido por el método de puente por dovelas sucesivas, esta metodología se rige por la utilización de dovelas prefabricadas de concreto con sección trapezoidal para la superestructura las cuales se colocan en sitio consecutivamente fijadas por torones post-tensados en pórticos de 30 metros de luz. Por otra parte, en la mitad del tramo de la línea 1 cuando se junta con la línea 2 en el centro histórico de la ciudad cambia de sistema de metro por uno subterráneo. A continuación, se presenta imagen representativa de la línea 1.



Figura 20 Imagen representativa de las dovelas aplicadas en la superestructura de la línea 1 del metro de Monterrey.

Fuente: Google Maps.

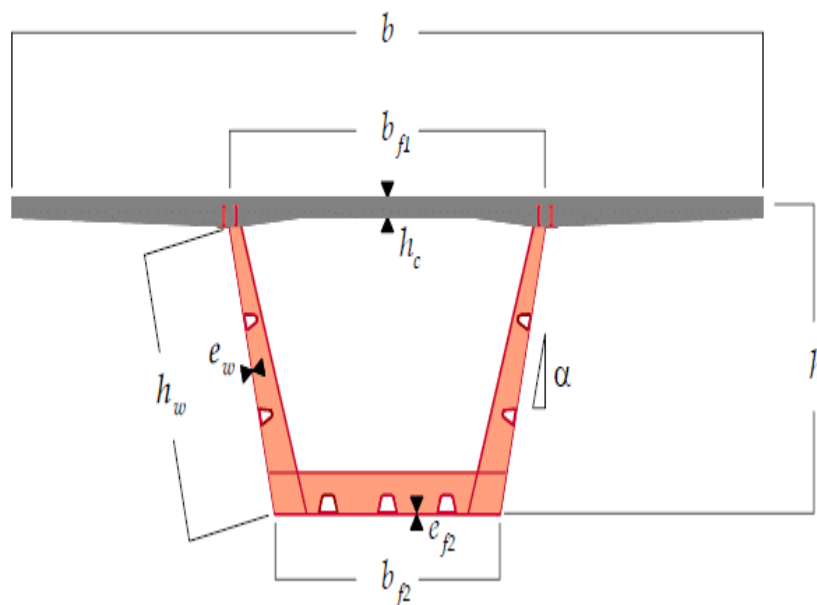


Figura 21 Gráfica representativa de la sección transversal de las dovelas aplicadas a la línea 1 del metro de Monterrey.

Fuente: (Bessini, 2014).

La línea 1 del metro de Monterrey cuenta con trenes con capacidad para transportar a más de 400 pasajeros y la frecuencia de los trenes en la Línea 1 es de aproximadamente

3 a 5 minutos en horas pico y 6 a 9 minutos en horas fuera de pico. Algunas de las estaciones más importantes de la línea 1 son la estación Alameda, que conecta con la estación de autobuses de la ciudad, y la estación Fundidora, que se encuentra en el Parque Fundidora, uno de los principales atractivos turísticos de Monterrey. Además, la línea 1 del metro también tiene conexión con otras líneas del sistema de transporte público de la ciudad, como el sistema de autobuses y el sistema de metrobús. A continuación, se presenta imagen del recorrido de la línea 1.



Figura 22 Gráfica representativa de la distribución de las estaciones de la línea 1 del metro de Monterrey.

Fuente: Secretaria de Movilidad del Estado de Nuevo León.

2.5.2 Metro de Monterrey línea 2

La Línea 2 del Metro de Monterrey es una línea de transporte rápido de pasajeros que se extiende por la zona metropolitana de Monterrey. Esta línea fue inaugurada en 2008 y cuenta con 13 estaciones que se extienden a lo largo de 13.7 km.

La línea 2 al igual que la línea 1 consta de dos sistemas de metro uno el cual está construido por el método de puente con dovelas sucesivas y el otro mediante un sistema subterráneo, la diferencia entre la línea 1 y 2 es que la mitad de su longitud es por el método de metro subterráneo. La línea 2 atraviesa por lo largo el centro histórico de la ciudad usando el método de construcción top-down para las estaciones y el método “cut

and cover” para los túneles del metro, todo esto con el fin de no afectar ni dañar la estética y la arquitectura del sector.



Figura 23 Estación Padre Mier de la línea 2 del metro de Monterrey.
Fuente: (LINEASDELMETRO.COM.MX, 2019)

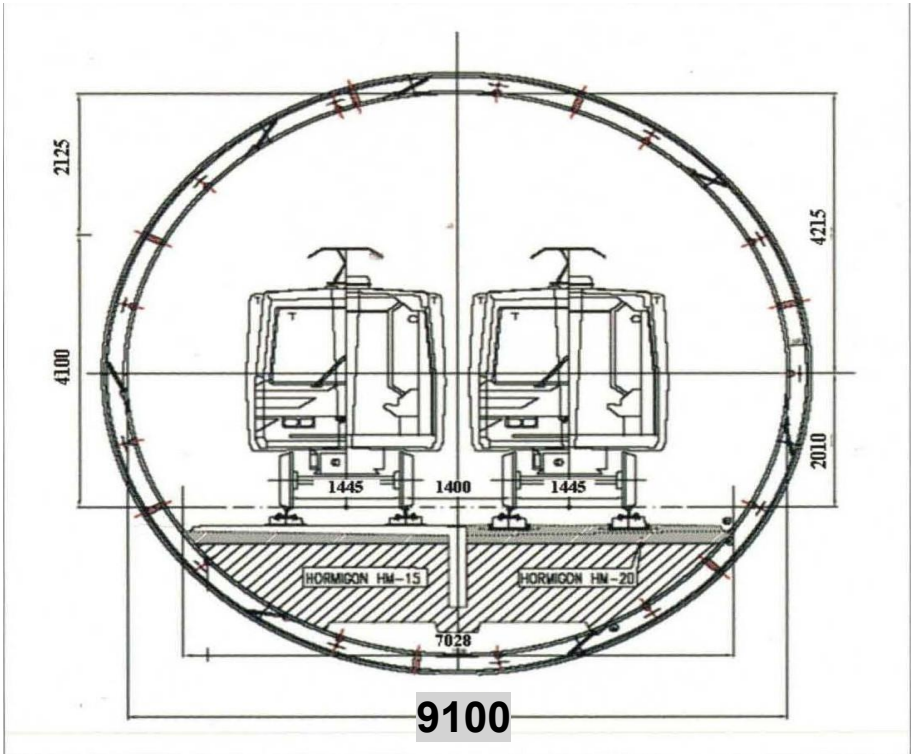


Figura 24 Gráfica representativa sección túnel para metro subterráneo.
Fuente: (COMUNIDAD DE MADRID CONSEJERIA DE TRANSPORTES E INFRAESTRUCTURAS, 2007).

La Línea 2 comienza en la estación General Zaragoza ubicada en el centro de Monterrey y termina en la estación Sendero en el municipio de San Nicolás de los Garza. A lo largo de su recorrido pasa por puntos importantes como la estación de autobuses de Monterrey, la Central de Autobuses, la Universidad Autónoma de Nuevo León, y el centro comercial Paseo La Fe.

La frecuencia de los trenes varía dependiendo de la hora del día, pero generalmente pasan cada 3 a 5 minutos en horas pico y 6 a 8 minutos en horas de menor afluencia.

La Línea 2 del Metro de Monterrey es una opción de transporte popular en la ciudad, ya que ofrece una alternativa económica y segura para desplazarse por la zona metropolitana. Además, conecta algunas de las áreas más transitadas de la ciudad, lo que la convierte en una opción práctica para los residentes y visitantes de Monterrey.



Figura 25 Gráfica representativa de la distribución de las estaciones de la línea 2 del metro de Monterrey.

Fuente: Secretaria de Movilidad del Estado de Nuevo León.

2.5.3 Metro de Monterrey línea 3

La línea 3 del metro de Monterrey fue inaugurada en el año 2021, de todas las líneas existentes es la más corta con una extensión de 7.5 Km y solo cuenta con solo 9 estaciones, pero es igualmente importante para la ciudad.



Figura 26 Imagen representativa de la línea 3 del metro de Monterrey.

Fuente: Google Maps.

La línea 3 del metro solo se limita a un sistema de metro el cual es por viaducto suspendido por dovelas prefabricadas de concreto, esta metodología constructiva al igual que la línea 1 se realizó mediante el anclaje de las dovelas por postensado en pórticos de 30 metros de luz, pero con la diferencia en que la sección transversal del viaducto es de tipo c. Se presenta imagen representativa.

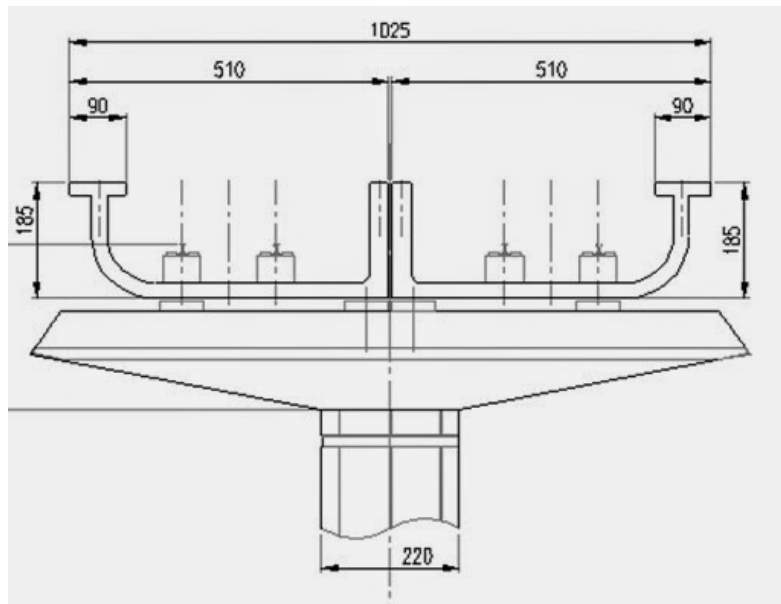


Figura 27 Imagen representativa sección transversal dovelas aplicadas a la línea 3 del metro de Monterrey.

Fuente: (Ramírez, 2014).

La línea 3 se extiende por 7.5 km desde la estación General Zaragoza hasta la estación Hospital Metropolitano conectando puntos importantes de la ciudad como el centro histórico, la zona hospitalaria y la Universidad Autónoma de Nuevo León.

La línea 3 se ha convertido en una opción popular para los habitantes de la zona noreste de la ciudad, ya que, ofrece fácil acceso a varios centros comerciales y zonas industriales, lo que la convierte en una opción conveniente para aquellos que buscan ir de compras o realizar negocios.

La frecuencia de los trenes en la Línea 3 es de aproximadamente 3 a 5 minutos en horas pico y de 6 a 9 minutos en horas fuera de pico. El costo del boleto es de 9 pesos mexicanos con descuentos disponibles para estudiantes y personas de la tercera edad.



Figura 28 Gráfica representativa de la distribución de las estaciones de la línea 3 del metro de Monterrey.

Fuente: Secretaria de Movilidad del Estado de Nuevo León.

2.6 Equipos y materiales para el proceso constructivo de la superestructura del sistema de metro duorriel tren ligero y monorriel.

2.6.1 Equipos

2.6.1.1 Grúa móvil

Las grúas móviles son equipos diseñados para facilitar la construcción de puentes y otros proyectos de construcción similares como por ejemplo los viaductos elevados. Su función principal es levantar y colocar vigas y otros elementos de gran tamaño o peso, lo que puede ser una tarea difícil o imposible de realizar manualmente.

Una grúa móvil típicamente consta de una estructura metálica, un brazo telescópico o un sistema de pluma y un gancho de carga. El brazo telescópico o sistema de pluma puede ser extendido y retraído para ajustar su alcance y capacidad de elevación. El gancho de carga está diseñado para engancharse en la viga de puente o en otra carga pesada y levantarla de manera segura.

El equipo está montado en una base móvil, que puede ser una plataforma sobre ruedas o un sistema de orugas. La base móvil permite que la grúa se desplace a lo largo del sitio de construcción para acceder a las vigas de puente en diferentes ubicaciones.

La mayoría de las grúas para vigas de puente tienen una capacidad de carga que oscila entre las 50 y las 300 toneladas, lo que significa que pueden levantar y mover dovelas y vigas de puente sin problema (TECNOLOGIA LOGISTICA Y MONTAJE SA, 2019).

El funcionamiento de una grúa móvil es relativamente simple. El operador de la grúa maneja los controles desde una cabina ubicada en la base móvil. Los controles pueden ser hidráulicos o eléctricos permitiendo al operador ajustar la posición del brazo o de la pluma, así como la posición del gancho de carga.

El operador también debe asegurarse de que la carga esté enganchada de manera segura antes de levantarla. Una vez que se ha levantado la carga, la grúa la mueve a su ubicación final y la baja suavemente en su lugar. El operador debe tener cuidado de no dañar la carga ni poner en peligro a los trabajadores en el sitio de construcción.

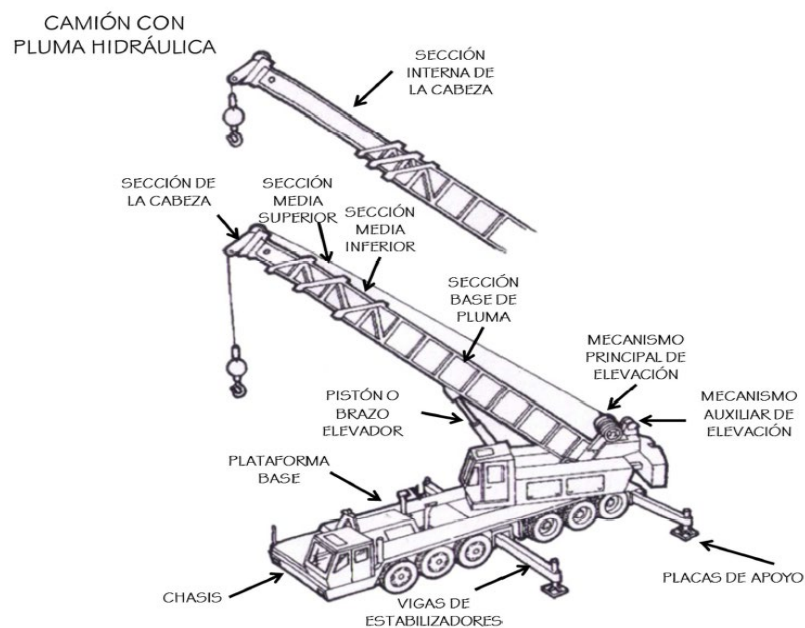


Figura 29 Gráfica representativa de las partes de una grúa hidráulica para izaje de puentes.

Fuente: (TECNOLOGIA LOGISTICA Y MONTAJE SA, 2019).

2.6.1.2 Camión Mixer

El camión Mixer es un vehículo diseñado para transportar y mezclar concreto. Es ampliamente utilizado en la industria de la construcción para el suministro de concreto fresco a los sitios de trabajo.

El camión Mixer tiene un tambor giratorio montado en la parte trasera del vehículo. El tambor está fabricado de acero resistente y tiene una capacidad de entre 5 y 10 metros cúbicos. En la mayoría de los casos, el tambor puede girar en ambas direcciones para mezclar el concreto de manera uniforme (COMINKA MOTORS, 2020).

El Mixer de concreto también tiene un sistema de alimentación de agua y cemento, la cual, se almacena en un tanque en el chasis del vehículo y se agrega al tambor mediante una bomba.

La mayoría de los Mixer de concreto también tienen un sistema de boquillas para distribuir el concreto en el lugar de trabajo de manera más eficiente.

Para el funcionamiento de Mixer el operador carga los materiales en el tambor del camión, los cuales incluye; cemento, agua y agregados. Luego, el tambor gira para mezclar los materiales de manera uniforme. Durante el transporte, el tambor sigue girando para evitar que el concreto se asiente y se endurezca.

Una vez que el camión llega al sitio de trabajo, el tambor se inclina hacia adelante y el concreto se descarga.



Figura 30 Gráfica representativa de las partes de un camión Mixer.

Fuente: (COMINKA MOTORS, 2020).

2.6.1.3 Bomba estacionaria de concreto

La bomba estacionaria de concreto es un equipo utilizado en la industria de la construcción para transportar y colocar concreto en cantidades deseadas a lugares de difícil acceso.

La bomba estacionaria de concreto es un equipo estacionario que consta de una tolva, un sistema de bombeo, tuberías y un brazo de distribución. La tolva es donde se carga el concreto, y tiene una capacidad de entre 4 y 10 metros cúbicos (I&A INGENIERIA Y ALQUILERES, 2021). El sistema de bombeo está compuesto por una bomba hidráulica de pistón que presuriza el concreto y lo impulsa a través de las tuberías. Las tuberías, a su vez, son de acero resistente y pueden tener una longitud de hasta 200 metros (I&A INGENIERIA Y ALQUILERES, 2021).

El brazo de distribución es el encargado de llevar el concreto a la ubicación deseada, este brazo es articulado y puede alcanzar alturas de hasta 50 metros y alcances horizontales de hasta 60 metros. Además, tiene una boquilla que permite ajustar la cantidad y la dirección del flujo de concreto (I&A INGENIERIA Y ALQUILERES, 2021). Para el funcionamiento de la bomba estacionaria, el concreto se carga en la tolva y se presuriza mediante la bomba hidráulica. Luego, el concreto es impulsado a través de las tuberías hacia el brazo de distribución. Una vez en el brazo, la boquilla permite ajustar la cantidad y la dirección del flujo de concreto.

La bomba estacionaria de concreto puede ser controlada desde una estación de control remoto o por un operador que se encuentra en la parte superior del brazo de distribución. Esto permite que el concreto sea distribuido de manera precisa en el lugar de trabajo.

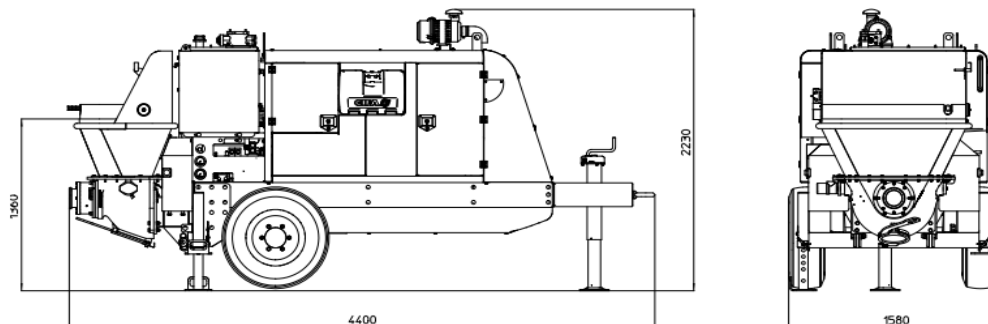


Figura 31 Imagen representativa de las dimensiones de una bomba estacionaria de concreto.

Fuente: (I&A INGENIERIA Y ALQUILERES, 2021).

2.6.1.4 Vibrador de hormigón

El vibrador de concreto es una herramienta utilizada en la construcción para compactar y nivelar el concreto recién colado. Su función principal es eliminar las burbujas de aire que quedan atrapadas en el concreto, lo cual, asegura que la estructura de concreto sea más resistente y duradera.

Un vibrador de concreto típicamente consta de un motor eléctrico o a gasolina, una varilla flexible y un cabezal vibrador. El motor se conecta al cabezal vibrador mediante una manguera flexible. El cabezal vibrador, que se sumerge en el concreto fresco, tiene una punta redondeada o plana para evitar dañar la superficie del concreto.

El equipo puede tener diferentes longitudes y diámetros de varilla, y la elección depende de la profundidad del elemento de concreto que se está construyendo.

Las vibraciones reducen la resistencia interna del concreto, lo que permite que las burbujas de aire suban a la superficie y escapen del concreto fresco. El operador debe mover la varilla lentamente en un patrón circular o hacia arriba y hacia abajo para asegurarse de que todas las áreas del concreto sean compactadas de manera uniforme (CONSTRUYENDOSEGURO, 2020).



Figura 32 Gráfica representativa de tipos de vibrador para concreto.

Fuente: (CONSTRUYENDOSEGURO, 2020).

2.6.1.5 Gato hidráulico

El gato hidráulico es el equipo de tensado el cual va a retener la fuerza aplicada a los torones impidiendo su retroceso. Los gatos hidráulicos se dividen en tipo E y T.

2.6.1.5.1 Gato hidráulico tipo E

Son gatos multitorón ligeros y fáciles de manejar, estos gatos hidráulicos ofrecen una operación manual básica y semiautomática para el acuñado y el soltado de los torones con una pérdida en el asiento de máximo 10 mm.



Figura 33 Imagen representativa de gato hidráulico multitorón tipo E.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.1.5.2 Gato hidráulico tipo T

Son gatos hidráulicos automáticos y multitorón, cuentan con sistema de amordazado y asentamiento de cuñas. Su promedio de operación es de 10 minutos para tensado y acuñado. Esta opción de gato hidráulico es para trabajos más precisos y opera también con torones cortos.



Figura 34 Imagen representativa de gato hidráulico multitorón tipo T.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.1.6 Unidades de bombeo para post-tensado.

Estos equipos es el que ofrece la potencia y el control hidráulico para que pueda operar correctamente el gato hidráulico para torones. Estos equipos pueden funcionar mediante motor eléctrico o a combustible. Se clasifican en tipo E y T.

2.6.1.6.1 Unidad de bombeo tipo E

Son bombas de doble circuito que se utilizan para acoplarse a los gatos hidráulicos tipo E, estas unidades de bombeo se utilizan para la retracción y tensado por medio de la presión del aceite.



Figura 35 Imagen representativa de unidad de bombeo tipo E.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.1.6.2 Unidad de bombeo tipo T

Son bombas de doble circuito que se utilizan para acoplarse a los gatos hidráulicos tipo T, estas unidades de bombeo se utilizan para la retracción, tensado y asentado de cuñas por medio de la presión del aceite.



Figura 36 Imagen representativa de unidad de bombeo tipo T.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.1.7 *Insertadora*

También conocida como empujadora de cables, este equipo inserta los cables torones a través de los ductos de post-tensado. Este equipo puede empujar cables torones de 5 y 6 pulgadas hasta una distancia máxima de 80 metros. (HERCAB, 2022)



Figura 37 Imagen representativa de insertadora de torones.

Fuente: (HERCAB, 2022).

2.6.1.8 *Engargoladura de ductos post-tensados*

Esta máquina sirve para hacer los ductos de post-tensado en sitio o en fabrica. Puede realizar tubos de hasta 200 mm de diámetro con aceros sin tratar o galvanizados.



Figura 38 Imagen representativa de engargoladura de ductos para torones.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.1.9 *Inyectadora de Grout.*

La inyectadora de Grout es el equipo que se utiliza para inyectar la lechada de concreto dentro de los ductos de post-tensado para lograr su correcto sellado. Este quipo debe trabajar a una presión promedio de 25 bares para garantizar la eliminación de burbujas de aire dentro de la mezcla.



Figura 39 Imagen representativa de inyectadora de Grout.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.1.10 *Carro de avance para dovela de cierre*

El carro de avance es un equipo que permite la construcción de la dovela de cierre en la superestructura del viaducto por dovelas. Este equipo consta de un carro que se asienta

sobre la superestructura ya consolidada y mediante cable permite la sujeción de moldes para construir la dovela de cierre.

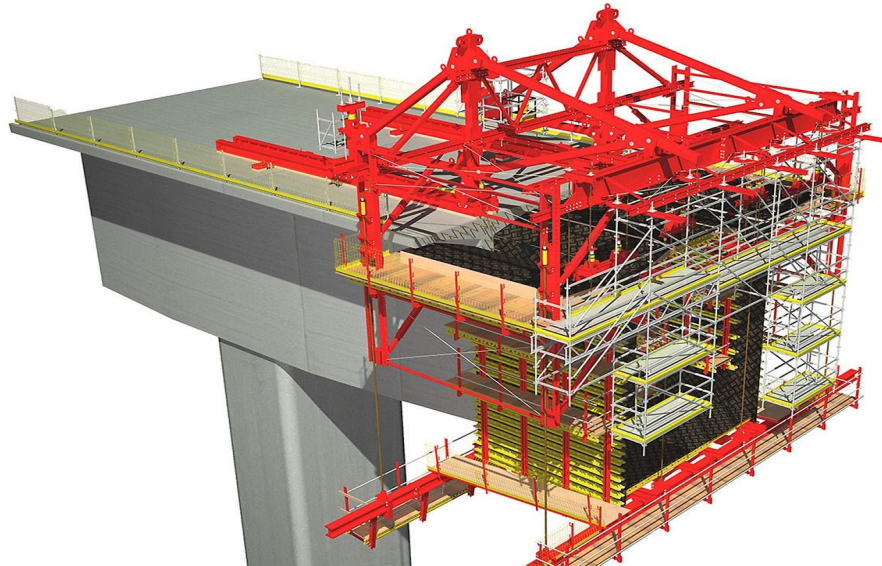


Figura 40 Gráfica representativa de un carro de avance para la construcción de un viaducto por voladizos sucesivos.

Fuente: (PERI España, 2023).

2.6.2 Materiales

2.6.2.1 Hormigón

El hormigón debe tener una buena docilidad para esto debe elaborarse de manera que su resultado sea uniforme, trabajable, transportable, de fácilmente colado y con una consistencia aceptable para el Fiscalizador.

Para lograr una buena docilidad en el hormigón se debe evitar usar áridos de formas alargadas y con aristas y también, el cemento debe ser de buena calidad

El contenido de cemento, relación máxima agua/cemento permitida, máximo revenimiento y otros requerimientos para todas las clases de hormigón a utilizarse en una construcción, deberán conformar como requisitos indispensables de las especificaciones técnicas de construcción.

Si en los documentos contractuales o en las especificaciones técnicas la resistencia a la compresión del hormigón está especificada a los 28 días, se debe realizar una prueba a los 7 días y deberá tener mínimo el 70% de la resistencia especificada a los 28 días (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

La temperatura del hormigón que va a colarse en sitio para el caso de losas de puentes y losas superiores en contacto con el tráfico no deberán exceder de 29°C, para otras estructuras la temperatura de fundición deberá especificarse en los planos (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

Para colocación de masas de hormigón que estén indicadas en planos y su fundición sea monolítica, en el momento de su colocación la temperatura no deberá ser superior a 24°C (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

Tabla 3 Clases y usos de cemento Portland para estructuras.

CLASE	TIPO DE HORMIGÓN	RESISTENCIA ESPECIFICADA A COMPRESIÓN f_c Mpa	RESISTENCIA ESPECIFICADA A TRACCIÓN POR FLEXION MR Mpa	RELACION AGUA/CEMENTO *	USO GENERAL (solamente información)
A	Estructura Especial	> 28	N/A	0.44	Obras de gran envergadura Puentes, Losa superior de alcantarillas de tráfico directo. Elementos prefabricados. Tanques y reservorios
B	Estructural	Entre 21 y 28	N/A	0.58	Losas, vigas, viguetas, columnas, nervaduras de acero, alcantarillas de cajón, estribos, muros, zapatas armadas.
C	Para elementos trabajando a tracción	N/A	> 3.5	0.46	Pavimentos rígidos, tanques y reservorios cilíndricos o cónicos
D	Para compactar con rodillo o con pavimentadora	N/A	> 3.5	0.36	Pavimentos, presas de gravedad
E	No estructural	Entre 14 y 18	N/A	0.65	Zapatas sin armar, replantillos, bordillos, contrapisos
F	Ciclópeo	> 12	N/A	0.70	Muros, estribos y plintos no estructurales
G	Relleno fluido	Entre 0.5 y 8	N/A	--	Rellenos para nivelación, bases de pavimentos, rellenos de zanjas y excavaciones

Fuente: (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

2.6.2.2 Acero de refuerzo $F_y=4200\text{kg/cm}^2$

El acero de refuerzo para concreto será de carácter corrugado y este deberá ser almacenado en plataformas u otros soportes adecuados de tal forma que no esté en contacto con la superficie del terreno evitando daños necesarios por agentes externos y deterioro por oxidación.

Las barras y el alambre de acero serán protegidos en todo tiempo de daños y, cuando se los coloque en la obra, estarán libres de suciedad, escamas sueltas, herrumbrado, pintura, aceite u otra sustancia inaceptable.

Tabla 4 Diámetros de varillas corrugadas para refuerzo de hormigón.

Designación de la barra (véase la nota)	Diámetro de referencia en pulgadas	DIMENSIONES NOMINALES			Masa kg/m
		Diámetro mm	Area mm ²	Perímetro mm	
No. 2	1/4"	6.4	32	20.0	0.250
No. 3	3/8"	9.5	71	30.0	0.560
No. 4	1/2"	12.7	129	40.0	0.994
No. 5	5/8"	15.9	199	50.0	1.552
No. 6	3/4"	19.1	284	60.0	2.235
No. 7	7/8"	22.2	387	70.0	3.042
No. 8	1"	25.4	510	80.0	3.973
No. 9	1-1/8"	28.7	645	90.0	5.060
No. 10	1-1/4"	32.3	819	101.3	6.404
No. 11	1-3/8"	35.8	1006	112.5	7.907
No. 14	1-3/4"	43.0	1452	135.1	11.380
No. 18	2-1/4"	57.3	2581	180.1	20.240

Fuente: (CONSTRUYESINGENIERIA, 2023).

2.6.2.3 Dovelas prefabricadas de concreto

Las dovelas prefabricadas de concreto son estructuras de característica tipo viga cajón hueco que constan con un tablero encima que cumple la función de viaducto. Las dovelas al ser prefabricadas poseen medidas estándares en su longitud, estas varían desde los 3 a 5 metros (Gerardino Perdomo, 2011) según se requiera y en cuanto a su sección transversal se adaptan moldes para cumplir con los requisitos del diseño.

Las dovelas prefabricadas de concreto son elementos de concreto reforzado que poseen ductos para el paso de los torones y se fabrican mediante moldes.

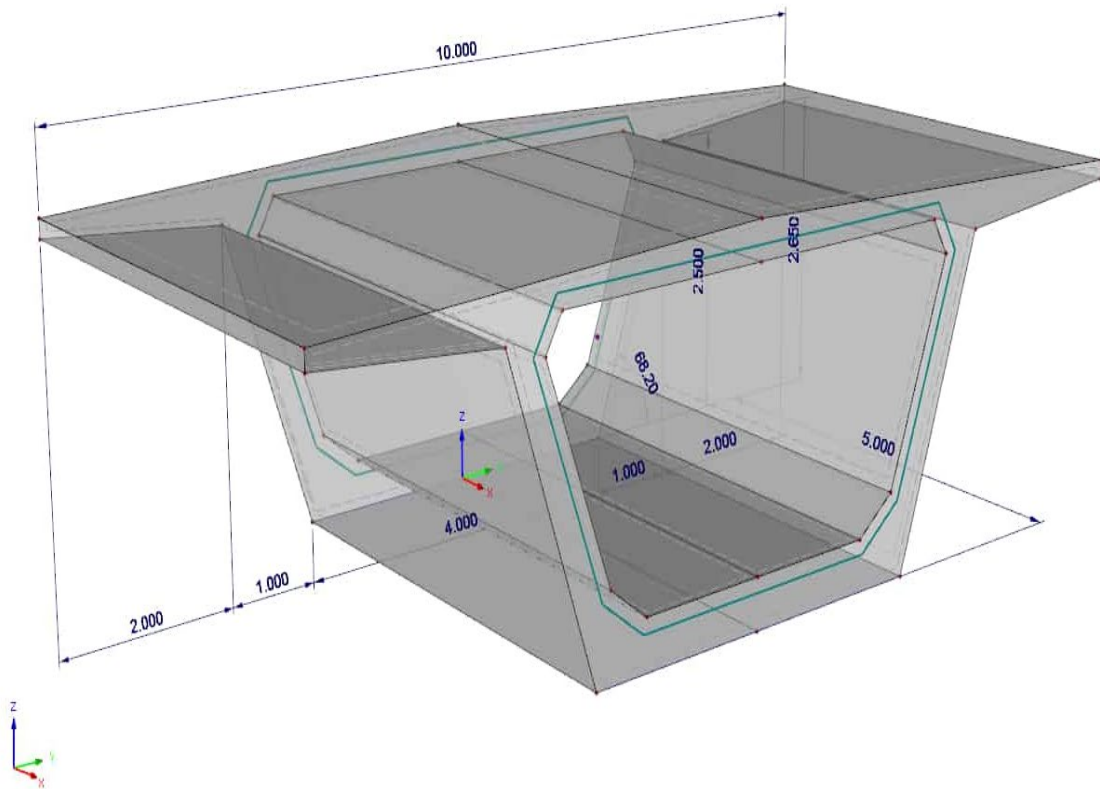


Figura 41 Gráfica representativa de dovela prefabricada de concreto.

Fuente: (Dlupal Latinoamerica, 2016).

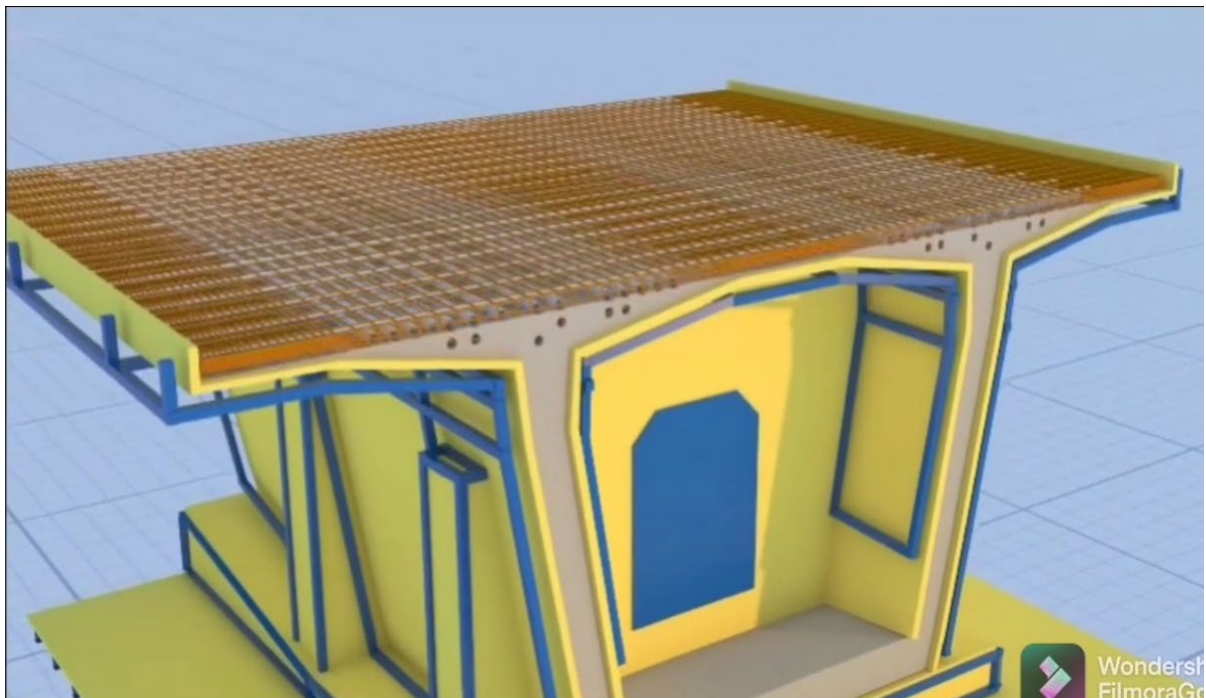


Figura 42 Gráfica representativa del molde para fabricación de dovelas de concreto.

Fuente: (Juvenal del Castillo Moisés, 2021).

2.6.2.4 Torones para post-tensados

Los cables de acero para preesfuerzo conformado de 7 alambres, se regirá por el ASTM A 416 y las especificaciones del Departamento de Materiales D – 9 – 4500 (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

Todas las barras se regirán por el ASTM A 722 y los alambres de acero deberán regirse por el código ASTM A 421 (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

El muestreo y los ensayos para control y aceptación del alambre de acero por emplearse en el preesfuerzo del hormigón, se harán de acuerdo a los procedimientos señalados en las Especificaciones AASHTO: M-204 Y T-244, y se retirará para este propósito una muestra de 2.00 metros de longitud, de cada lote, carrete o rollo (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

El cable de acero empleado en la precompresión del hormigón está formado por varios cordones, generalmente de 7 alambres, enrollados helicoidalmente alrededor de un núcleo central. El cable será construido con acero de alta resistencia, y cumplirá los requisitos establecidos en la Especificación AASHTO M-203 (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

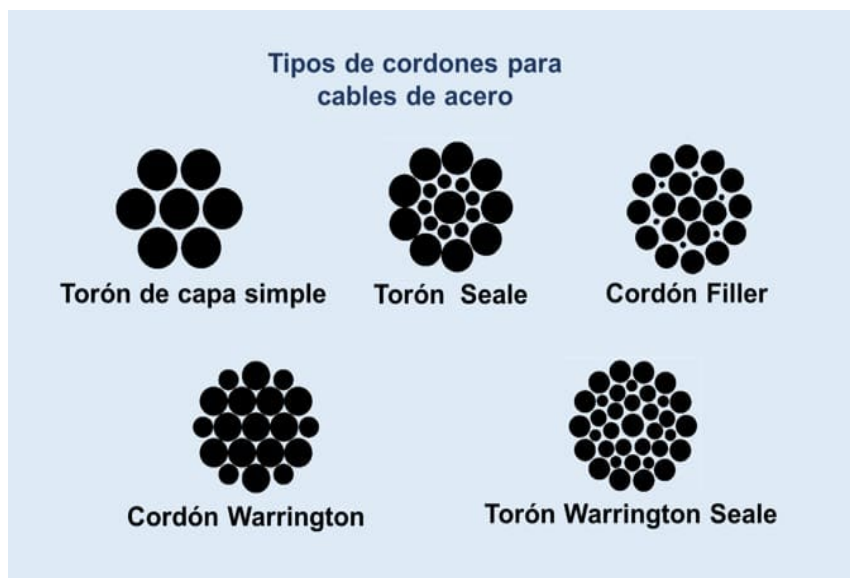


Figura 43 Gráfica representativa de los tipos de torones según su cantidad de cables.

Fuente: (Deingenierias.com, 2022).

Las muestras para control y aceptación del cable de acero por emplearse en el preesfuerzo del hormigón, se tomarán por cada 20 toneladas o fracción de cada tipo o

diámetro de cable a emplearse en obra, retirando un trozo de longitud adecuada del extremo de cada rollo. Si la muestra presentare juntas o empalmes, se desechará y se tomará una nueva muestra (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

La elongación total del cable, al momento de la rotura, no será menor al 3.5% de la longitud de la probeta. Si la rotura se produce fuera de los apoyos del extensómetro, o en las muelas de la máquina de tensión, pero se cumple lo indicado, se considerará satisfactorio el ensayo (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

2.6.2.5 Anclajes para post-tensado

Los anclajes son dispositivos que se usan para fijar los torones con la fuerza suministrada por el gato hidráulico, estos dispositivos son de acero de alta resistencia y pueden ser de tipo activo o pasivo según su requerimiento en el elemento estructural.

2.6.2.5.1 Anclaje activo simple AS

Los anclajes activos también se los conoce como móviles, estos anclajes van situados en los extremos de los torones y este anclaje es el que va a soportar la fuerza del tensado.



Figura 44 Imagen representativa de anclaje tipo AS.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.2.5.2 Anclaje activo para post-tensado externo AE

Este tipo de anclaje es diseñado para trabajar específicamente ante requerimientos dinámicos en los extremos de los torones externos y también cumple con una función de recubrimiento anticorrosión.



Figura 45 Imagen representativa de anclaje tipo AE.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.2.5.3 Anclaje activo con rosca AR

Este tipo de anclaje se utiliza cuando el diseño estructural requiere que a los torones se le apliquen fuerzas de tensado posteriormente a las realizadas por el gato hidráulico.



Figura 46 Imagen representativa de anclaje tipo AR.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.2.5.4 Anclaje pasivo por adherencia PA

A este tipo de anclajes también se lo conoce como anclaje fijo. Este tipo de anclaje se utiliza cuando se requiere tensado solo desde un extremo del torón.



Figura 47 Imagen representativa de anclaje tipo PA.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.2.5.5 Anclaje pasivo con cabezas PC

Son tipos de anclajes fijos que se utilizan del lado donde no se tensa el torón.



Figura 48 Imagen representativa de anclaje tipo PC.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.2.6 *Acopladores para post-tensado*

2.6.2.6.1 Acopladores fijos

Estos acopladores son dispositivos que se utilizan para darle unión a los torones de post-tensado.

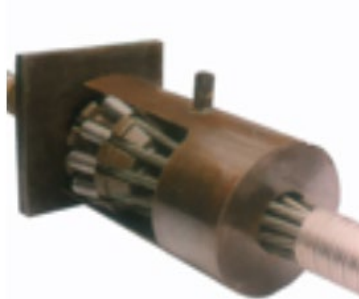


Figura 49 Imagen representativa de acopladores fijos.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.2.6.2 Acopladores móviles

Estos acopladores son dispositivos que se utilizan para darle continuidad a los torones de post-tensado.



Figura 50 Imagen representativa de acopladores móviles.

Fuente: (MEXPRESA, 2020).

2.6.2.7 Ductos para post-tensado

Se refiere ductos para post-tensado a los ductos que se utilizan para el paso de los torones en el elemento estructural, estos ductos pueden ser metálicos o plásticos y deben ser engargolados.

Los ductos de post-tensado al ser engargolados se garantiza la estanqueidad del ducto durante el colado y también la transmisión de la adherencia acero-cemento una vez fraguada la lechada de inyección.



Figura 51 Imagen representativa de ducto plástico para torones post-tensados.

Fuente: (<https://es.made-in-china.com>, 2023).



Figura 52 Imagen representativa de ducto metálico para torones post-tensados.

Fuente: (<https://mtt-maxim.com/>, 2023).

2.7 Proceso constructivo de la superestructura del sistema convencional duorriel tren ligero sobre viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto

Para la construcción de la superestructura de un viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas se requieren de dos etapas el montaje de las dovelas y la unión de las dovelas por post-tensado. Todo este proceso garantiza la continuidad del proceso constructivo y lleva un rendimiento promedio de 2 dovelas al día por cada frente de trabajo (Gerardino Perdomo, 2011).

Para el montaje de las dovelas se emplean dos tipos de métodos, uno el cual se aplica una viga de lanzamiento para colocar las dovelas y el otro mediante grúa.

2.7.1 Montaje de las dovelas prefabricadas

La viga de lanzamiento es una maquinaria metálica la cual posee una longitud de hasta 197 metros y una capacidad de hasta 90 toneladas (Gerardino Perdomo, 2011). Sin embargo, este método se lo aplica solo para la realización de viaductos para autopistas de gran capacidad vehicular puesto que, la máquina viga de lanzamiento ocupa una gran área de trabajo lo cual dificultaría su trabajo en medio de una urbe.

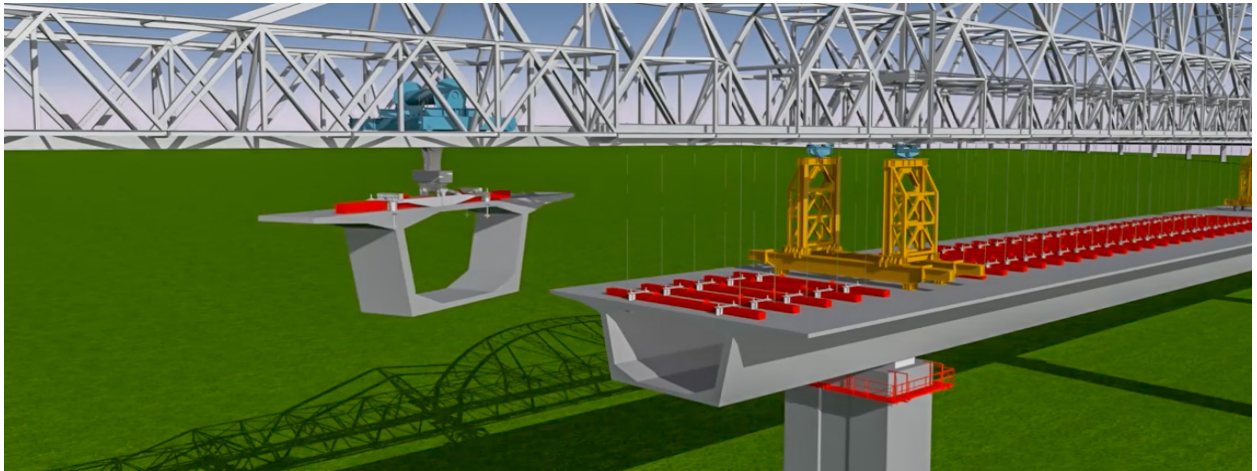


Figura 53: Imagen representativa de una Viga de lanzamiento para viaducto por dovelas prefabricadas.

Fuente: (BERD ONE BRIDGE ONE SOLUTION, 2023).

El método de usar grúa se adapta mejor a las necesidades de construcción de un metro tipo viaducto por dovelas sucesivas. La grúa ocupa una menor área de trabajo lo cual facilita su movilidad por los espacios reducidos que se presenta en una construcción que atraviesa una urbe densamente poblada como lo es la ciudad de Monterrey. La grúa deberá ser de tipo hidráulica y móvil para poder realizar las maniobras necesarias para el izaje de dovelas y deberá contar con una capacidad de carga de 60 toneladas (Gerardino Perdomo, 2011).



Figura 54 Izaje de dovelas prefabricadas con grúa.

Fuente: (Conchita Serrano, Martínez Cutillas, & González-Velrio Navarro, 2015).

La grúa para debe ser con movilización neumática para poder transitar por las urbes sin afectar las estructuras existentes y podrá ser de movilización con oruga en lugares donde la calzada sea de terracería.

2.7.1.1 Secuencia de montaje de las dovelas prefabricadas

Para la secuencia de montaje o Izaje de las dovelas se proceder a los siguientes pasos:

1. Colocar el camión de transporte de las dovelas o almacenar las dovelas a izar lo más cerca de la grúa.
2. Se procede a realizar el estrobado, lo cual, consiste en sujetar las dovelas al dispositivo de elevación de la grúa.
3. Se procede a realizar el Izaje de la dovela a su respectivo sitio de colocado.
4. En el sitio de colocado se procede a la alineación y nivelación para su posición definitiva dada por topografía previa.
5. Asegurar la dovela con la fijación provisional o parcial de la misma.
6. Destrobar la dovela y repetir el ciclo de Izaje si las condiciones mecánicas e ingenieriles lo permiten (radio de giro, posicionamiento de la grúa). Caso contrario reubicar la grúa y repetir el ciclo (TECNOLOGIA LOGISTICA Y MONTAJE SA, 2019).

2.7.2 Unión de las dovelas

La unión de dovelas es el proceso mediante el cual se realiza el anclaje de una dovela con otra, estas dovelas se dividen en 3 tipos; dovela de arranque, dovela de sucesión y dovela de cierre. Las dovelas para anclarse entre sí se lleva a cabo un proceso de post-tensado el cual debe realizarse con una fuerza de tensado no menor a 0.3 MPA (Gerardino Perdomo, 2011).

La carga aplicada a los torones por el gato hidráulico se transfiere a los anclajes, los cuales, distribuirán esa carga al hormigón de tal manera que se cumplan los siguientes requisitos:

- A) El esfuerzo final a la compresión que soportará el hormigón por debajo de la placa de anclaje no deberá exceder de los 210 kg/cm².
- B) El esfuerzo a la flexión en la placa de anclaje debido al preesfuerzo, no excederá el valor de fluencia del material ni causará deformaciones apreciables en la placa

de anclaje cuando se aplique una carga igual al 95% de la última resistencia a la tensión de los torones.

Los dispositivos de anclaje y demás accesorios se deben fabricar de con acero inoxidable o deben ser de acero galvanizado, y antes de su aplicación, se deberá presentar la certificación y garantía del fabricante. Todas las piezas que se aplicarán a la dovela para el post-tensado tendrán una tolerancia tal que todas ellas sean irremplazables para el futuro (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2023).

2.7.2.1 *Dovela de arranque*

La dovela de arranque o la dovela “0”, es la dovela con la cual se va a empezar el proceso de construcción de la superestructura del viaducto (Gerardino Perdomo, 2011). Esta dovela cuenta con la característica especial de que se colocan ductos transversales a la dovela para poder anclarse a la pila por esfuerzo de tensión de torones. La dovela de arranque se iza por medio de la grúa hidráulica hasta elevarla en una posición sobre la pila, luego, se procede a instalar los apoyos de neopreno y se comienza a asentar la dovela hasta su posición final. Al terminar de colocar la dovela en su posición final se continua con el proceso de anclaje a la pila por medio del esfuerzo de post-tensado. Una vez conformada la dovela de arranque esta servirá de contrapeso para las dovelas sucesivas.

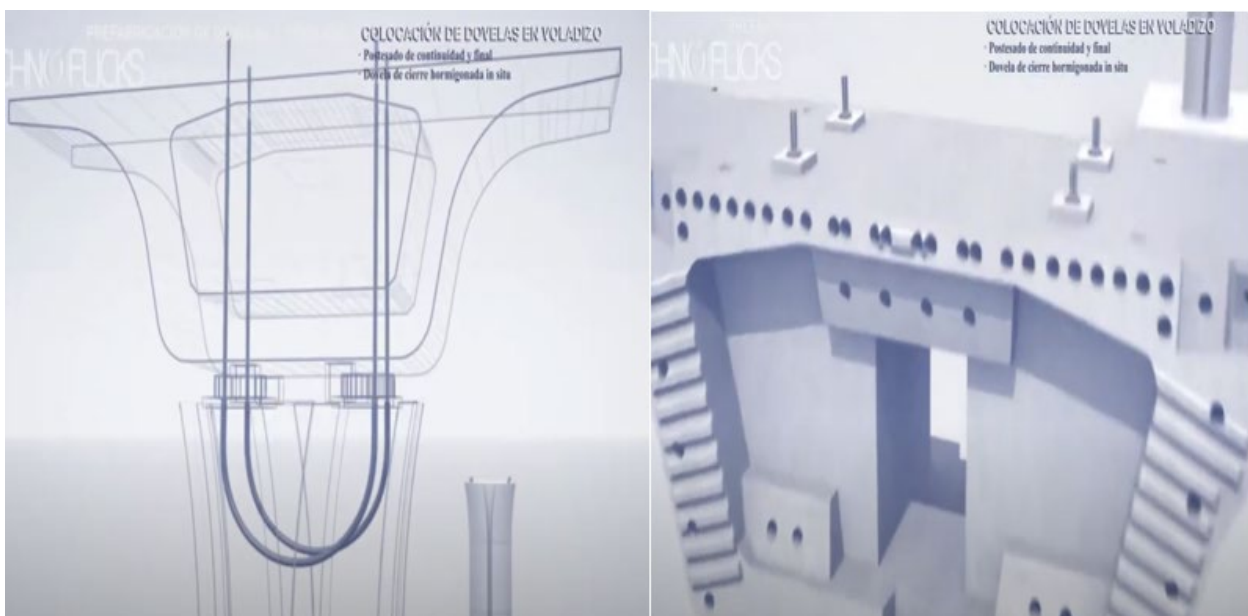


Figura 55 Gráfica representativa del proceso de anclaje para dovela “0”.

Fuente: (Badio, 2018).

2.7.2.2 Dovelas sucesivas

Las dovelas sucesivas son aquellas dovelas que se instalan después de la dovela de arranque. Se empieza el proceso constructivo izando la primera dovela hasta colocarla en la posición deseada a un lado de la dovela de arranque. Las caras de las dovelas que van a estar en contacto se les debe verter grout de alta resistencia para que cumpla la función de sellado de juntas. Se procede a realizar el mismo proceso del otro lado de la dovela de arranque y se empieza a pasar los torones superiores por el ducto de post-tensado a lo largo de las dovelas según lo indique las especificaciones técnicas.

Una vez colocados los torones superiores se procede introducir la placa de anclaje y se aplica la fuerza de tensionamiento con el gato hidráulico. Al alcanzar la fuerza de tensado se procede a retirar el gato y se inserta una lechada de cemento dentro de los ductos de post-tensado con la inyectora de grout para que los cables no se puedan oxidar.

Este proceso constructivo se repite de manera simétrica por cada pila hasta poder llegar a la intersección de las dovelas de la siguiente pila donde para terminar la construcción de la superestructura se procede a realizar la dovela de cierre (Gerardino Perdomo, 2011).

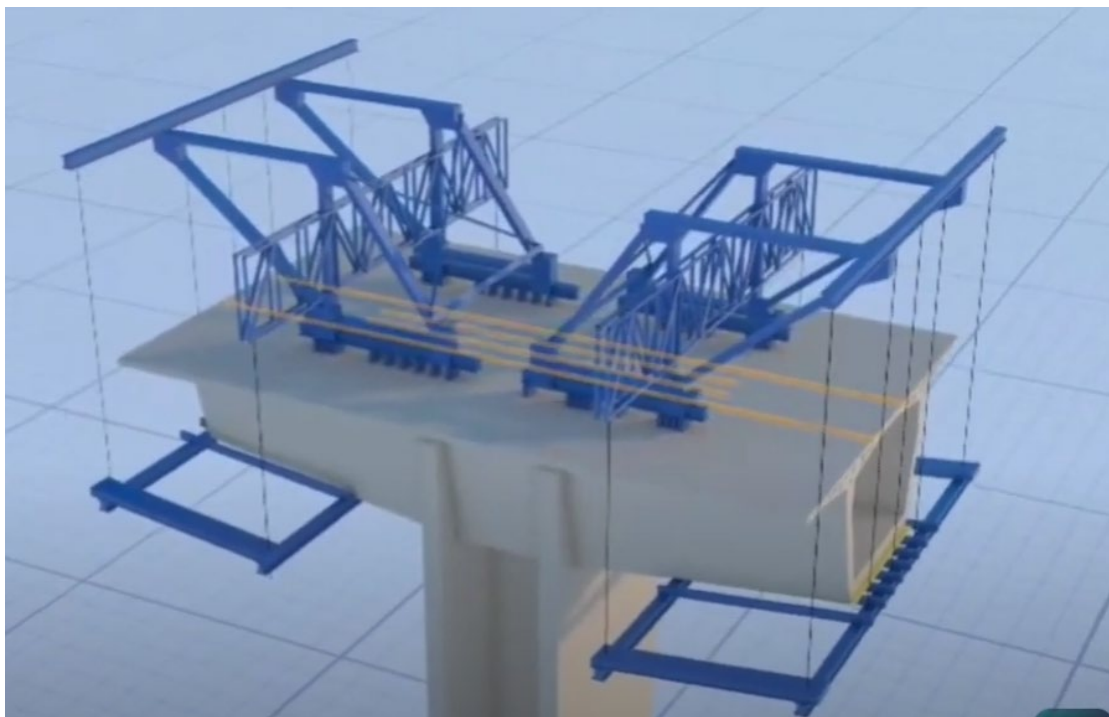


Figura 56 Gráfica representativa de colocación de dovelas sucesivas.

Fuente: (Juvenal del Castillo Moisés, 2021).

2.7.2.3 Dovela de cierre

La dovela de cierre es aquella dovela que se construye en sitio y se adapta a las necesidades geométricas en cuanto a su longitud para la unión de la superestructura. La dovela de cierre se construye mediante moldes tipo encofrado que dan las características geométricas de la dovela. Para soportar el peso de los moldes y la estructura de la dovela de cierre se utiliza el carro de avance. Una vez instalado los moldes se a realizar la respectiva nivelación en conjunto con topografía para tener conformidad en la superestructura, se procede a realizar el armado de la dovela de cierre y por último se realiza el colado de hormigón, esta dovela se tarda un promedio de 7 días para su desencofrado (Gerardino Perdomo, 2011).

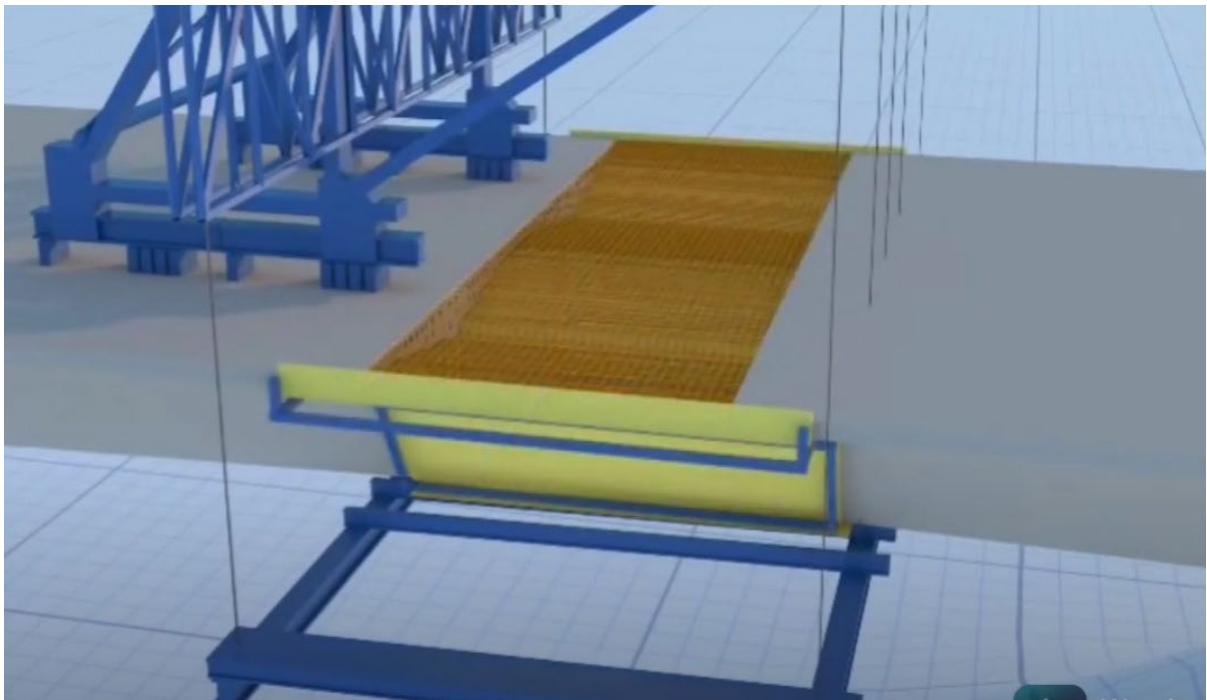


Figura 57 Gráfica representativa de la construcción de dovela de cierre con carro de avance.

Fuente: (Juvenal del Castillo Moisés, 2021).

Una vez terminada la dovela de cierre se procede realizar el tensionamiento de continuidad, el cual es la instalación de los torones inferiores de las dovelas por medio de acoples y anclajes y por consiguiente realizar el proceso de post-tensado de los torones para así terminar el proceso constructivo de la superestructura de un sistema convencional tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas.

2.8 Proceso constructivo de la superestructura para el sistema monorriel sobre viga

Para la construcción de la superestructura de un sistema de metro tipo monorriel sobre viga se requieren de dos etapas; El montaje de las vigas prefabricadas y la construcción de las juntas entre vigas.

El proceso constructivo de la superestructura se realiza en pórticos compuestos de 120 metros, donde este pórtico compuesto está dividido en 4 pórticos simples de 30 metros de luz. En cada extremo del pórtico compuesto se colocan juntas de expansión en las juntas de las vigas para que no se produzca fisuras en el colado de la junta. A este tipo de junta se las denomina juntas externas y las juntas entre los pórticos simples se las conoce como juntas intermedias.

Todo este proceso garantiza la continuidad del proceso constructivo y lleva un rendimiento promedio de 2 vigas al día por cada frente de trabajo.

2.8.1 Montaje de vigas prefabricadas para monorriel

2.8.1.1 *Izado de las vigas prefabricadas*

El izado de las vigas requiere el movimiento de grandes elementos estructurales de concreto armado con un promedio de 28 metros de largo y con un peso de hasta 90 ton, por lo cual, todas las operaciones de izaje dentro de las zonas de mayor concentración poblacional y vehicular se realizan en horario nocturno con el fin de que las afecciones al tráfico sean reducidas.

Las vigas se transportarán empleando camiones con remolque articulado hasta posicionarlas en el área de anclaje de las grúas.



Figura 58 Transporte de viga prefabricada de concreto para monorriel

Fuente: MotaEngil-México.

Una vez situada la viga, se disponen dos grúas de gran tonelaje lo más próximas posible a las columnas que delimitan el claro donde se colocará la viga



Figura 59 Grúas para izado de viga.

Fuente: MotaEngil-México.

Para el proceso de izado de las vigas se dispondrá de algún dispositivo de anclaje que evite crear defectos en la viga por rozaduras o golpes y garantice la sujeción de la viga con la grúa.



Figura 60 Dispositivo de izado de viga para monorriel

Fuente: MotaEngil-México.

Las maniobras de montaje se completan en un promedio de 3 horas, de modo que el tráfico puede restablecerse antes del amanecer.



Figura 61 Secuencia de izado de viga para monorriel

Fuente: MotaEngil-México.

2.8.1.2 Ajuste de la viga para monorriel

Antes de colar las juntas y hacer monolítica la viga con los cabezales, es preciso ajustar la geometría de la viga al trazo exacto según lo indique topografía. Para ellos se dispone de equipos de gatos hidráulicos que permiten orientar las vigas en todas las direcciones. Los gatos hidráulicos son:

- Dos gatos verticales de apoyo por extremo de viga para ajustar la trabe en cuanto a la altura de las vigas prefabricadas.
- Dos gatos inclinados por extremo de viga para ajustar la sobre elevación o la inclinación de las vigas prefabricadas.

Los gatos inclinados se retiran una vez colada las juntas mientras que los gatos verticales se los deja en sitio para que sirvan como disipadores de energía.



Figura 62 Gatos hidráulicos para ajuste viga para monorriel.

Fuente: MotaEngil-México.

2.8.2 Colado de juntas de vigas

El colado de las juntas para las vigas se realiza in situ, el tipo de hormigón que se aplica en la junta es la de las mismas características del hormigón implementado en la viga prefabricada.

2.8.2.1 Colado in situ y postensado

Primero se realiza el colado in situ de las juntas intermedias. Cuando el concreto ha endurecido en un promedio de 2 días se procede al post-tensado de los cables de continuidad.



Figura 63 Tramo con junta intermedia colada en sitio.

Fuente: MotaEngil-México.

Finalmente se cuelan las juntas extremas y en esta operación se disponen las juntas expansivas tipo peine entre las vigas.



Figura 64 Colocación de junta expansiva en juntas externas previo al colado.

Fuente: MotaEngil-México.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

El presente proyecto se realiza bajo la metodología comparativa, mediante la cual, se propone un nuevo método que consiste en realizar una tabla de comparación dividida en 3 capítulos. Estos capítulos son fundamentales para la comparación del sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto versus el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto, haciendo énfasis en la superestructura de ambos sistemas ya que esta es su principal diferencia en cuanto a obra civil. Entre los capítulos a evaluar tenemos los procesos constructivos, el impacto ambiental y el ámbito económico. Una vez se realice la comparación se procede a hacer el análisis de sostenibilidad del sistema de metro escogido.

Para los procesos constructivos se evalúa la cantidad de tiempo del montaje de la superestructura, los equipos y los materiales a implementarse en la construcción de la superestructura de ambos casos de estudio.

Para el ámbito económico se realiza la comparación del costo por kilómetro lineal de vía de ambos sistemas de metro los cuales serán obtenidos de un histórico de proyectos realizados por la empresa MotaEngil en diferentes ciudades de México y del mundo. También, se realiza la comparativa de la cantidad de acero de refuerzo y de hormigón por metro lineal que se utiliza en la superestructura de ambos casos de estudio.

En la parte ambiental se analiza la emisión de huella de carbono producto de la implementación del acero de refuerzo y hormigón para la superestructura de los casos de estudio. También, se realiza la comparación del impacto ambiental por contaminación acústica para el sistema metro tipo monorriel sobre viga versus el sistema de metro tren ligero por viaducto. Por último, se realiza el impacto a la imagen urbana de las zonas por la intrusión visual (Oró Quixal, 2005) debido a la implementación de la superestructura de ambos casos de estudio.

Una vez realizado el análisis comparativo de los procesos constructivos, el ámbito económico y el impacto ambiental se procede a realizar una evaluación de sostenibilidad. Todo este proceso se realiza para poder evaluar cual sistema es el óptimo a aplicar en la construcción de las nuevas líneas del metro de Monterrey.

3.1 Identificación de los antecedentes

En el capítulo 1 INTRODUCCIÓN se identifican los factores mediante los cuales surge la necesidad de mejorar los sistemas constructivos para las nuevas líneas del metro de Monterrey. Donde entre sus principales factores son:

1. Reducción de la contaminación del aire por la producción de las partículas suspendidas PM10 y PM2.5, producto de la explotación de canteras para la elaboración de concreto.
2. Reducción de los tiempos en los procesos constructivos para bajar la afectación e interrupción del tráfico en las zonas donde pasarán las nuevas líneas del metro de Monterrey.
3. Reducción de costos por la disminución de materiales a implementarse en los procesos constructivos de la superestructura.
4. Reducción al impacto de la estética en los lugares donde se implementarán las nuevas líneas del metro con el fin de no afectar a las zonas comerciales presentes en dichas zonas.

3.2 Descripción de los sistemas de metro para los casos de estudio.

Para el capítulo 2 ESTADO DEL ARTE se comienza con la introducción del concepto de un sistema ferroviario describiendo su historia y usos a lo largo del tiempo.

Luego, se precede a la introducción de los sistemas ferroviarios, de cada caso de estudio; tipo convencional duorriel y monorriel, donde, para sistema se describen sus características principales, clasificación y usos.

Una vez determinado los casos de estudio, se procede a la introducción de los elementos prefabricados de concreto aplicados a los sistemas ferroviarios actuales, donde se hace énfasis de la aplicación de estos elementos en la construcción de la superestructura para los sistemas de metro.

Al concluir con la definición de los elementos prefabricados de concreto para la construcción de la superestructura de sistemas de metros, se procede a describir las líneas de metro ya existentes en la ciudad de Monterrey, donde se determina el trazado de cada línea de metro, número de estaciones, cantidad de personas que utilizan los

sistemas de metro, tipo de sistema de metro aplicado en cada línea y método constructivo que se implementó para cada línea.

Una vez definidas las características de cada línea del metro ya existente en la ciudad de Monterrey, se procede a determinar los materiales, equipos y procesos constructivos para la superestructura del sistema de metro duorriel tren ligero elevado por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto y el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto.

3.3 Método para comparar los sistemas de metro duorriel tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto versus sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto

Para poder evaluar los sistemas de metro duorriel tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto con el sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto, se procede a realizar la tabla comparativa propuesta, donde, se expone para ambos casos de estudio 3 categorías; Los procesos constructivos, el impacto ambiental y el ámbito económico.

3.3.1 Método de evaluación para los procesos constructivos

Para la evaluación de los procesos constructivos se propone realizar el método de evaluación en 3 subcategorías las cuales son; La cantidad de tiempo de construcción de la superestructura, los materiales para postensado y los equipos.

La evaluación de estas 3 subcategorías se limita su análisis a la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz, ya que, geometría fue aplicada en los pórticos de los viaductos de las líneas de metro 1 y 3, así como, también se estableció para el proyecto de las nuevas líneas del metro Monterrey.

3.3.1.1 Método para el tiempo de construcción de la superestructura

3.3.1.1.1 Método de evaluación del tiempo de construcción para la superestructura del sistema de metro tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto

Se calcula la cantidad de tiempo en días que tarda el montaje de las dovelas de arranque y sucesivas contando desde su sujeción en la grúa hasta su colocación final en el pórtico incluyendo sus respectivos procesos de postensado, más la cantidad de tiempo que toma la construcción y colado de la dovela de cierre hasta poder retirar su cimbrado. Se rige bajo la siguiente fórmula:

$$T_{cs} = T_{mda} + N * T_{mds} + T_{cdc} \quad (3.1)$$

Donde:

- T_{cs} = Tiempo de construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.
- T_{mda} = Tiempo de montaje de la dovela de arranque.
- T_{mds} = Tiempo de montaje de una dovela sucesiva.
- N = Número de dovelas sucesivas.
- T_{cdc} = Tiempo de construcción de la dovela de cierre.

3.3.1.1.2 Método de evaluación del tiempo de construcción para la superestructura del sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto

Se calcula la cantidad de tiempo en días que toma el montaje de las dos vigas prefabricadas de concreto desde su sujeción en la grúa hasta su colocación en el pórtico incluyendo sus procesos de postensado, más el tiempo de construcción y colado de una junta entre vigas hasta poder retirar el cimbrado. Se realiza la siguiente fórmula:

$$T_{cs} = 2 * T_{mv} + 2 * T_{cj} \quad (3.2)$$

Donde:

- T_{cs} = Tiempo de construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

Tmv = Tiempo de montaje de la viga prefabricada de concreto.

Tcj = Tiempo de construcción de junta entre vigas.

3.3.1.2 Método para los equipos a utilizar en la construcción de la superestructura

Para esta subcategoría se realiza el análisis en tres ítems; Maquinaria para el izaje de la superestructura y equipos para los procesos de postensado y equipos para el colado de hormigón. Donde, para cada ítem se realiza una tabla mediante la cual se detalla y cuantifica los equipos respectivos a utilizar en cada sistema. Finalmente, para cada ítem se suma la cantidad total de equipos a implementarse. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$Te = Tm + Tep + Tec \quad (3.3)$$

Donde:

Te = Total de equipos a implementarse en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

Tm = Total de grúas a usarse para el izaje de los elementos prefabricados en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

Tep = Total de equipos que se utiliza para los procesos de postensado en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

Tec = Total de equipos que se utiliza para el colado de hormigón en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

3.3.1.3 Método para los materiales a implementarse en los procesos de postensado de la superestructura

Se detalla y cuantifica los materiales necesarios para poder realizar los procesos de postensado en la superestructura de cada caso de estudio. Se omite la evaluación del hormigón y acero de refuerzo ya que estos serán objeto de estudio en el ámbito económico. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$Tma = Tac + Ta + Tl + Td$$

Donde:

Tma = Total de materiales para los procesos de postensado en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

Tac = Total de anclajes que se utiliza en la en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

Ta = Total acoples que se utiliza en la en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

TI = Total líneas de torones que se utiliza en la en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

Td = Total ductos para postensado que se utiliza en la en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.

3.3.2 Método de evaluación del ámbito económico

La evaluación económica se la realiza en 3 subcategorías; El costo por kilómetro lineal de vía de sistema de metro, la cantidad de acero por metro lineal de vía de superestructura y la cantidad de hormigón por metro lineal de vía de superestructura.

Para el costo por kilómetro lineal de vía de sistema de metro, se obtiene el costo promedio el cual se calcula de una base de proyectos históricos de sistemas de metro similares a los casos de estudio que fueron construidos por la empresa MotaEngil en diferentes ciudades del mundo.

También, se cuantifica la cantidad de acero de refuerzo y hormigón por metro lineal de vía a utilizarse en la superestructura de los casos de estudio para comparar cual requiere menor cantidad de estos y resulte más económico.

3.3.2.1 Método para el costo por kilómetro lineal del sistema de metro

Se presenta una tabla proporcionada por la empresa MotaEngil de costos históricos por kilómetro lineal de proyectos de sistemas de metro ya construidos por la empresa en distintas ciudades de México y del mundo.

De todos los costos por kilómetro lineal presentados se selecciona los costos de los proyectos similares a los dos casos de estudio de los cuales se obtiene un costo promedio por kilómetro lineal para luego proceder a la comparación de ambos. Se utiliza la siguiente formula:

$$C_{prom} = \frac{\sum CP}{n} \quad (3.5)$$

Donde:

C_{prom} = Costo promedio por kilómetro del sistema de metro.

CP = Costo histórico por kilómetro de sistema de metro.

n = Cantidad de costos históricos a evaluarse.

3.3.2.2 Método para la cantidad de acero de refuerzo por metro lineal

Para el caso del sistema convencional de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto se extrae la cantidad de acero de refuerzo en kilogramos por metro lineal referente a un plano de dovela de 5 metros de longitud, la cual, se implementó en la construcción de las anteriores líneas del metro de Monterrey.

Para el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto se extrae la cantidad de acero de refuerzo en kilogramos por metro lineal referente al plano de viga de 21 metros de longitud, la cual, se estable para el proyecto de las nuevas líneas del metro de Monterrey.

Una vez obtenidos los pesos del acero de refuerzo por metro lineal de cada sistema se procede a la comparación de ambos.

Se utiliza las siguientes formulas:

- a) Para el caso del sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada.

$$P_{uv} = \frac{W_{av}}{L_v} \quad (3.6)$$

Donde:

P_{uv} = Peso unitario del acero de refuerzo de la viga prefabricada de concreto.

W_{av} = Peso del acero de refuerzo de la viga prefabricada de concreto.

L_v = Longitud de la viga prefabricada de concreto para monorriel.

- b) Para el caso del sistema de metro convencional tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas.

$$P_{ud} = \frac{W_{ad}}{L_d} \tag{3.7}$$

Donde:

P_{ud} = Peso unitario del acero de refuerzo de la dovela prefabricada de concreto.

W_{ad} = Peso del acero de refuerzo de la dovela prefabricada de concreto.

L_d = Longitud de la dovela prefabricada de concreto.

3.3.2.3 Método para el volumen de hormigón por metro lineal

Para el caso de sistema convencional de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto se extrae el volumen de hormigón en metros cúbicos por metro lineal referente a un plano de dovela de 5 metros de longitud, la cual, se implementó en la construcción de las anteriores líneas del metro de Monterrey.

Para el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto se extrae volumen de hormigón en metros cúbicos por metro lineal referente al plano de viga de 21 metros de longitud, la cual, se estable para el proyecto de las nuevas líneas del metro de Monterrey.

Una vez obtenidos los volúmenes de hormigón por metro lineal de cada sistema se procede a la comparación de ambos.

Se utiliza las siguientes formulas:

a) Para el sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada.

$$V_{uv} = \frac{V_v}{L_v} \quad (3.8)$$

Donde:

V_{uv} = Volumen unitario de concreto en la viga prefabricada de concreto.

V_v = Volumen de concreto de la viga prefabricada de concreto.

L_v = Longitud de la viga prefabricada de concreto para monorriel.

b) Para el caso del sistema de metro convencional tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas.

$$V_{ud} = \frac{V_d}{L_d} \quad (3.9)$$

Donde:

V_{ud} = Volumen unitario de concreto en la dovela prefabricada de concreto.

V_d = Volumen de concreto de la dovela prefabricada de concreto.

L_d = Longitud de la dovela prefabricada de concreto.

3.3.3 Método de evaluación del impacto ambiental

La evaluación ambiental se realiza en 3 subcategorías importantes; La emisión de huella de carbono producto de la implementación del acero de refuerzo y hormigón en la superestructura de los casos de estudio, la contaminación acústica para un sistema de metro tipo monorriel sobre viga y sistema de metro tren ligero por viaducto, y el impacto

a la imagen urbana por la intrusión visual (Oró Quixal, 2005) a las zonas donde se proyecta las nuevas líneas del metro de Monterrey para cada caso de estudio.

3.3.3.1 Método para la contaminación del aire.

Se calcula la cantidad de Dióxido de Carbono (CO₂) en toneladas por metro lineal producto por la implementación del acero de refuerzo y concreto en la superestructura de ambos casos de estudio.

Una vez obtenido cada valor se procede a multiplicarlo por la longitud total de las nuevas líneas del metro obteniendo un estimado de producción de Dióxido de Carbono en toneladas para cada sistema y así poder evaluarlos.

Se omite el acero de refuerzo y cemento implementado en las estaciones ya que estas no varían sus dimensiones geométricas para ambos casos de estudio.

Se utiliza la siguiente fórmula.

$$TCO_2 = Lp * (Ta + Tc) \tag{3.10}$$

Donde:

TCO_2 = Toneladas de CO₂ producidas por la construcción de la superestructura del sistema de metro.

Lp = Longitud del proyecto.

Ta = Toneladas de CO₂ por metro lineal producidas por implementación del acero de refuerzo en la superestructura del sistema de metro.

Tc = Toneladas de CO₂ por metro lineal producidas por implementación concreto en la superestructura del sistema de metro.

3.3.3.2 Método para la contaminación acústica

Se establece para cada sistema de metro el nivel de decibelios (dB) que se produce por la emisión de ruido, luego se evalúa los resultados en base a los estándares de la OMS

y la normativa mexicana con el fin de establecer cuál de los sistemas cumple con la normativa. Se utiliza la siguiente formula:

$$Rp = \frac{\sum Rs}{x} \quad (3.11)$$

Donde:

Rp = Promedio del ruido producido los sistemas de metro evaluados.

Rs = Ruido producido por el sistema de metro.

x = Número de sistemas de metro evaluados.

3.3.3.3 Método para el impacto a la imagen urbana

Se calcula el área en metros cuadrados en planta y corte longitudinal que ocupa la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz para cada caso de estudio, para así, poder determinar cuál de estos dos sistemas afecta menos a la imagen urbana.

Se utiliza la siguiente formula:

$$Ai = Ac + Ap \quad (3.12)$$

Donde:

Ai = Área de intrusión visual de la superestructura de un sistema de metro.

Ac = Área del corte longitudinal de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz en un sistema de metro.

Ap = Área en planta de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz en un sistema de metro.

3.3.4 Esquema de la tabla comparativa de los casos de estudio

A continuación, se presenta la tabla comparativa mediante la cual se propone evaluar al sistema de metro duorriel tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto con el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto.

Tabla 5 Tabla comparativa para los procesos constructivos de los casos de estudio

No	EVALUACION	SISTEMA DE METRO TIPO VIADUCTO SUSPENDIDO POR DOVELAS SUCESIVAS PREFABRICADAS DE CONCRETO	SISTEMA DE METRO TIPO MONORRIEL SOBRE VIGA PREFABRICADA DE CONCRETO
1. PROCESOS CONSTRUCTIVOS			
1.1	Tiempo de construcción de la superestructura	<i>Cantidad en días que toma la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.</i>	
1.2	Equipos para la construcción de la superestructura	<i>Cantidad de equipos a implementarse en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz.</i>	
1.3	Materiales para postensado	<i>Cantidad de materiales que se utiliza en los procesos de postensado para la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz. Se omite hormigón y acero de refuerzo.</i>	
2. AMBITO ECONOMICO			
2.1	Costo por kilómetro de sistema de metro	<i>Costo en USD/KM, obtenido del promedio de costos históricos de proyectos similares ya construidos por la empresa MOTAENGIL.</i>	
2.2	Acero de refuerzo en la superestructura	<i>Cantidad de acero de refuerzo en TON/ML que se utiliza en la superestructura de cada sistema de metro.</i>	
2.3	Volumen de concreto en la superestructura	<i>Volumen de concreto en M3/ML que se utiliza en la superestructura de cada sistema de metro.</i>	
3. IMPACTO AMBIENTAL			

3.1	Contaminación del aire	<i>Cantidad de CO2 en TONCO2, que se produce por la implementación del acero de refuerzo y el concreto en toda la longitud de la superestructura del sistema de metro.</i>
3.2	Contaminación acústica	<i>Cantidad de ruido en decibelios (dB), que se produce por el sistema de metro.</i>
3.3	Impacto a la imagen urbana	<i>Cantidad de área en m2 que ocupa la planta y corte longitudinal de la superestructura del sistema de metro, en un pórtico de 30 metros de luz.</i>

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Selección del sistema de metro a construirse en la ciudad de Monterrey

3.4.1 Método de puntaje para los procesos constructivos

El criterio de asignación de puntaje se realiza bajo la siguiente tabla:

Tabla 6 Criterio de puntaje para los procesos constructivos

1. PROCESOS CONSTRUCTIVOS		
1.1	Tiempo de construcción de la superestructura	<i>Si la diferencia de tiempos esta entre el 1 y 25 % el sistema que tenga menor tiempo suma 3 puntos y el otro 2.</i>
		<i>Si la diferencia de tiempos esta entre el 25 y 50 % el sistema que tenga menor tiempo suma 4 puntos y el otro 1.</i>
		<i>Si la diferencia de tiempos es mayor al 50 % el sistema que tenga menor tiempo suma 5 puntos y el otro 0.</i>
1.2	Equipos para la construcción de la superestructura	<i>Si la diferencia de equipos esta entre el 1 y 25 % el sistema que tenga menor equipos suma 3 puntos y el otro 2.</i>
		<i>Si la diferencia de equipos esta entre el 25 y 50 % el sistema que tenga menor equipos suma 4 puntos y el otro 1.</i>
		<i>Si la diferencia de equipos es mayor al 50 % el sistema que tenga menor equipos suma 5 puntos y el otro 0.</i>

1.3	Materiales para postensado	<i>Si la diferencia de materiales para postensado está entre el 1 y 25 % el sistema que tenga menor cantidad de materiales suma 3 puntos y el otro 2.</i>
		<i>Si la diferencia de materiales para postensado está entre el 25 y 50 % el sistema que tenga menor cantidad de materiales suma 4 puntos y el otro 1.</i>
		<i>Si la diferencia de materiales para postensado es mayor al 50 % el sistema que tenga menor tiempo cantidad de materiales suma 5 puntos y el otro 0.</i>

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Método de puntaje para el ámbito económico

El criterio de asignación de puntaje se realiza bajo la siguiente tabla:

Tabla 7 Criterio de puntaje para el ámbito económico

2. AMBITO ECONOMICO		
2.1	Costo por kilómetro de sistema de metro	<i>Si la diferencia de costos esta entre el 1 y 25 % el sistema que tenga menor costo suma 20 puntos y el otro 10.</i>
		<i>Si la diferencia de costos esta entre el 25 y 50 % el sistema que tenga menor costos suma 25 puntos y el otro 5.</i>
		<i>Si la diferencia de costos es mayor al 50 % el sistema que tenga menor costos suma 30 puntos y el otro 0.</i>
2.2	Acero de refuerzo en la superestructura	<i>Si la diferencia del acero de refuerzo esta entre el 1 y 25 % el sistema que tenga menor acero de refuerzo suma 6 puntos y el otro 4.</i>
		<i>Si la diferencia del acero de refuerzo esta entre el 25 y 50 % el sistema que tenga menor acero de refuerzo suma 8 puntos y el otro 2.</i>
		<i>Si la diferencia del acero de refuerzo es mayor al 50 % el sistema que tenga menor acero de refuerzo suma 10 puntos y el otro 0.</i>

2.3	Volumen de concreto en la superestructura	<i>Si la diferencia del volumen de concreto esta entre el 1 y 25 % el sistema que tenga menor tiempo suma 6 puntos y el otro 4.</i>
		<i>Si la diferencia del volumen de concreto esta entre el 25 y 50 % el sistema que tenga menor tiempo suma 8 puntos y el otro 2.</i>
		<i>Si la diferencia del volumen de concreto es mayor al 50 % el sistema que tenga menor tiempo suma 10 puntos y el otro 0.</i>

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Método de puntaje para el impacto ambiental

El criterio de asignación de puntaje se realiza bajo la siguiente tabla:

Tabla 8 Criterio de puntaje para el impacto ambiental

3. IMPACTO AMBIENTAL		
3.1	Contaminación del aire	<i>Si la diferencia de emisión de CO2 está entre el 1 y 25 % el sistema que tenga menor emisión de CO2 suma 3 puntos y el otro 2.</i>
		<i>Si la diferencia de emisión de CO2 está entre el 25 y 50 % el sistema que tenga menor emisión de CO2 suma 4 puntos y el otro 1.</i>
		<i>Si la diferencia de emisión de CO2 es mayor al 50 % el sistema que tenga menor emisión de CO2 suma 5 puntos y el otro 0.</i>
3.2	Contaminación acústica	<i>Si el sistema de metro no cumple con ninguna norma suma 0 puntos.</i>
		<i>Si el sistema de metro cumple con una norma suma 5 puntos.</i>
		<i>Si el sistema de metro cumple con las dos norma suma 10 puntos.</i>

3.3	Impacto a la imagen urbana	<i>Si la diferencia de las áreas de intrusión visual esta entre el 1 y 25 % el sistema que tenga menor área suma 3 puntos y el otro 2.</i>
		<i>Si la diferencia de las áreas de intrusión visual esta entre el 25 y 50 % el sistema que tenga menor área suma 4 puntos y el otro 1.</i>
		<i>Si la diferencia de las áreas de intrusión visual es mayor al 50 % el sistema que tenga menor área suma 5 puntos y el otro 0.</i>

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Selección del sistema de metro

El sistema de metro que obtenga el mayor puntaje es el óptimo a implementar en la construcción de las nuevas líneas del metro de Monterrey.

Al determinarse el sistema constructivo a aplicarse, se procede a realizar el análisis de sostenibilidad de dicho sistema de metro.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE SOSTENIBILIDAD

4.1 Análisis de los procesos constructivos

Como ya fue definido en el capítulo 3 el análisis de los procesos constructivos se realizará en 3 subcategorías. El análisis de los procesos constructivos, el análisis de los equipos y el análisis de los materiales a implementarse en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz para los sistemas de metro a evaluarse.

4.1.1 Análisis para el sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto

4.1.1.1 *Tiempo de construcción de la superestructura*

La cantidad de tiempo que tarda la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz está dada por la ecuación 3.1:

$$T_{cs} = T_{mda} + N * T_{mds} + T_{cdc}$$

Para poder realizar el cálculo de T_{cs} se toma de referencia el plano de una dovela prefabricada que se implementó en la construcción de las anteriores líneas del metro de Monterrey, donde, se tiene que para la longitud de la dovela prefabricada es 5 metros.

Un pórtico de 30 metros de luz está conformado por dos medias dovelas de arranque más 5 dovelas sucesivas y una dovela de cierre.

Como ya se estableció en el capítulo 2.7, el rendimiento del montaje de las dovelas es de 2 dovelas por día. Y, la construcción de la dovela de cierre toma un tiempo de 5 días.

Por lo tanto:

$T_{mda} = 1$ día.

$N = 5$

$T_{mds} = 0.5$ días.

Tcdc = 5 dias.

Entonces:

$$Tcs = 1 + 5 * 0.5 + 5$$

$$Tcs = 8.5 \text{ dias}$$

4.1.1.2 Equipos a utilizar en la construcción de la superestructura

La cantidad de equipos a utilizarse para la construcción de la superestructura está definida por la ecuación 3.3.

$$Te = Tm + Tep + Tec$$

Para la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz para el sistema de metro duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto se utiliza una grúa para el izaje de las dovelas. Por lo tanto:

$$Tm = 1$$

Para la identificación y cuantificación de los equipos que ayudarán a los procesos de postensado se realiza la siguiente tabla:

Tabla 9 Equipos a utilizar en los procesos de postensado para la superestructura de un sistema duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas

EQUIPOS PARA LOS PROCESOS DE POSTENSADO EN LA SUPERESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE METRO DUORRIEL TIPO VIADUCTO POR DOVELAS SUCESIVAS PREFABRICADAS			
No	EQUIPO	DETALLE	CANTIDAD
1	Gato Hidráulico	Equipo para proporcionar el esfuerzo de tensionamiento en los torones	4

2	Unidad de bombeo para postensado	Equipo para suministrar la fuerza de tensionamiento al gato hidráulico	4
3	Insertadora	Equipo para insertar los cables en los ductos de postensado	2
4	Inyectadora de grout	Equipo para inyectar grout dentro de los ductos de postensado	4
TOTAL			14

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto:

$$\text{Tep} = 14$$

Para la identificación y cuantificación de los equipos que ayudarán al colado de hormigón se realiza la siguiente tabla:

Tabla 10 Equipos a utilizar en el colado de hormigón para la superestructura de un sistema duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas

EQUIPOS PARA EL COLADO DE HORMIGON EN LA SUPERESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE METRO DUORRIEL TIPO VIADUCTO POR DOVELAS SUCESIVAS PREFABRICADAS			
No	EQUIPO	DETALLE	CANTIDAD
1	Camión Mixer	Equipo que se utilizará para el transporte del hormigón para el colado de las juntas	3
2	Bomba estacionaria	Equipo que sirve para bombear el hormigon desde el camión mixer hasta el sitio de colado de las juntas	1
3	Vibrador de hormigón	Equipo que se utilizará para el vibrado del hormigón en las juntas	4
4	Carro de avance	Para sujetar el cimbrado de la dovela de cierre	1

TOTAL	9
-------	---

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto:

$$T_{ec} = 9$$

Reemplazando terminos:

$$T_e = T_m + T_{ep} + T_{ec}$$

$$T_e = 1 + 14 + 9$$

$$T_e = 24 \text{ equipos}$$

4.1.1.3 Materiales a implementarse en los procesos de postensado de la superestructura

La cantidad de materiales a implementarse en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz está dada por la ecuación 3.4:

$$T_{ma} = T_{ac} + T_a + T_l + T_d$$

A continuación, se realiza una tabla donde se detalla y cuantifica cada factor de la ecuación 3.4.

Tabla 11 Materiales a implementarse en los procesos de postensado para la superestructura de un sistema duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto

MATERIALES PARA LOS PROCESOS DE POSTENSADO A IMPLEMENTARSE EN LA SUPERESTRUCTURA DE UN SISTEMA DUORRIEL TIPO VIADUCTO POR DOVELAS SUCESIVAS PREFABRICADAS			
No	MATERIAL	DETALLE	CANTIDAD

1	Anclajes (TAC)	Anclaje para fijar el tensionamiento de los torones	55
2	Acoples (TA)	Acoples en tensionamiento pasivo de las dovelas	55
3	Líneas de torones (TI)	Torones para postensado	55
4	Ductos para postensado (Td)	Ductos donde se introducirán los torones	55
TOTAL			220

Fuente: Elaboración propia.

Entonces se tiene que:

$$T_{ma} = 55 + 55 + 55 + 55$$

$$T_{ma} = 220 \text{ materiales para postensado}$$

4.1.2 Análisis para el sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto

4.1.2.1 Tiempo de construcción de la superestructura

La cantidad de tiempo que tarda la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz está dada por la ecuación 3.2:

$$T_{cs} = 2 * T_{mv} + T_{cj}$$

Para poder realizar el cálculo de T_{cs} se toma de referencia el plano de viga prefabricada que se estable en la construcción de las nuevas líneas del metro de Monterrey, donde, se tiene que para la longitud de la viga prefabricada es 21 metros.

Un pórtico de 30 metros de luz está conformado por dos vigas prefabricadas más 2 medias juntas entre vigas.

Como ya se estableció en el capítulo 2.8, el tiempo que tarda el montaje de una viga es de 4 horas. Y, la construcción de la junta entre vigas toma un tiempo de 2 días.

Por lo tanto:

$T_{mv} = 0.5$ día.

$T_{cj} = 2$ días.

Entonces:

$$T_{cs} = 2 * 0.5 + 2$$

$$T_{cs} = 3 \text{ días}$$

4.1.2.2 Equipos a utilizar en la construcción de la superestructura

La cantidad de equipos a utilizarse para la construcción de la superestructura está definida por la ecuación 3.3.

$$T_e = T_m + T_{ep} + T_{ec}$$

Para la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz para el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto se implementan 2 grúas, las cuales, sujetan ambos extremos de la viga. Por lo tanto:

$$T_m = 2$$

Para la identificación y cuantificación de los equipos que ayudarán a los procesos de postensado se realiza la siguiente tabla:

Tabla 12 Equipos para los procesos de postensado en la superestructura de un sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto

EQUIPOS PARA LOS PROCESOS DE POSTENSADO EN LA SUPERESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE METRO TIPO MONORRIEL SOBRE VIGA PREFABRICADA DE CONCRETO			
No	EQUIPO	DETALLE	CANTIDAD

1	Gato Hidráulico	Equipo para proporcionar el esfuerzo de tensionamiento en los torones	2
2	Unidad de bombeo para postensado	Equipo para suministrar la fuerza de tensionamiento al gato hidráulico	2
3	Insertadora	Equipo para insertar los cables en los ductos de postensado	2
4	Inyectadora de grout	Equipo para inyectar grout dentro de los ductos de postensado	2
TOTAL			8

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto:

$$Tep = 8$$

Para la identificación y cuantificación de los equipos que ayudarán al colado de hormigón se realiza la siguiente tabla:

Tabla 13 Equipos a utilizar en el colado de hormigón para la superestructura de un sistema duorriel tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas

EQUIPOS PARA EL COLADO DE HORMIGON EN LA SUPERESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE METRO DUORRIEL TIPO VIADUCTO POR DOVELAS SUCESIVAS PREFABRICADAS			
No	EQUIPO	DETALLE	CANTIDAD
1	Camión Mixer	Equipo que se utilizará para el transporte del hormigón para el colado de las juntas	2
2	Bomba estacionaria	Equipo que sirve para bombear el hormigon desde el camión mixer hasta el sitio de colado de las juntas	1

3	Vibrador de hormigón	Equipo que se utilizará para el vibrado del hormigón en las juntas	2
4	Carro de avance	Para sujetar el cimbrado de la dovela de cierre	0
TOTAL			6

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto:

$$T_{ec} = 6$$

Reemplazando terminos:

$$T_e = T_m + T_{ep} + T_{ec}$$

$$T_e = 2 + 8 + 6$$

$$T_e = 16 \text{ equipos}$$

4.1.2.3 Materiales a implementarse en los procesos de postensado de la superestructura

La cantidad de materiales a implementarse en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz está dada por la ecuación 3.4:

$$T_{ma} = T_{ac} + T_a + T_l + T_d$$

A continuación, se realiza una tabla donde se detalla y cuantifica cada factor de la ecuación 3.4.

Tabla 14 Materiales para los procesos de postensado a implementarse en la superestructura de un sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto

MATERIALES PARA LOS PROCESOS DE POSTENSADO A IMPLEMENTARSE EN LA SUPERESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE METRO MONORRIEL SOBRE VIGA PREFABRICADA DE CONCRETO			
No	MATERIAL	DETALLE	CANTIDAD
1	Anclajes (TAC)	Anclaje para fijar el tensionamiento de los torones	10
2	Acoples (TA)	Acoples en tensionamiento pasivo de las dovelas	10
3	Líneas de torones (TI)	Torones para postensado	10
4	Ductos para postensado (Td)	Ductos donde se introducirán los torones	10
TOTAL			40

Fuente: Elaboración propia.

Entonces se tiene que:

$$Tma = 10 + 10 + 10 + 10$$

$$Tma = 40 \text{ materiales para postensado}$$

4.2 Análisis del ámbito económico

Como ya fue definido en el capítulo 3 el análisis del ámbito económico se realizará en 3 subcategorías. El costo por Kilometro lineal de sistema de metro, el análisis de la cantidad de acero de refuerzo en la superestructura y el análisis del volumen de concreto a utilizar en la construcción de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz para los sistemas de metro a evaluarse.

4.2.1 Análisis para el sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto

4.2.1.1 Costo por kilómetro lineal del sistema de metro

En el país de México la empresa MotaEgil-México ha realizado la construcción de varios sistemas de metro. Entre los sistemas de metro que han desarrollado está el sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas prefabricadas de concreto. Bajo este sistema de metro se encuentra el metro de la ciudad de Guadalajara línea 3, el cual, se inauguró en el año 2020, posee una longitud de 21.5 kilómetros y su costo por kilómetro lineal fue de 71 millones de dólares.

También se encuentra el metro de la ciudad de Monterrey línea 3, el cual, se inauguró en el año 2021, posee una longitud de 7.5 kilómetros y su costo por kilómetro lineal fue de 63 millones de dólares.

Dado los costos históricos de proyectos realizados por la empresa MotaEngil-México, se procede a calcular costo promedio por kilómetro lineal del sistema de metro utilizando la ecuación 3.5.

$$C_{prom} = \frac{\sum CP}{n}$$

Remplazando términos:

$$C_{prom} = \frac{(71 + 63)}{2}$$

$$C_{prom} = 67 \frac{MUSD}{KM}$$

4.2.1.2 Cantidad de acero de refuerzo en la superestructura

Se tienen los siguientes planos del detalle del acero de refuerzo para la dovela prefabricada de concreto $L_d = 5m$.

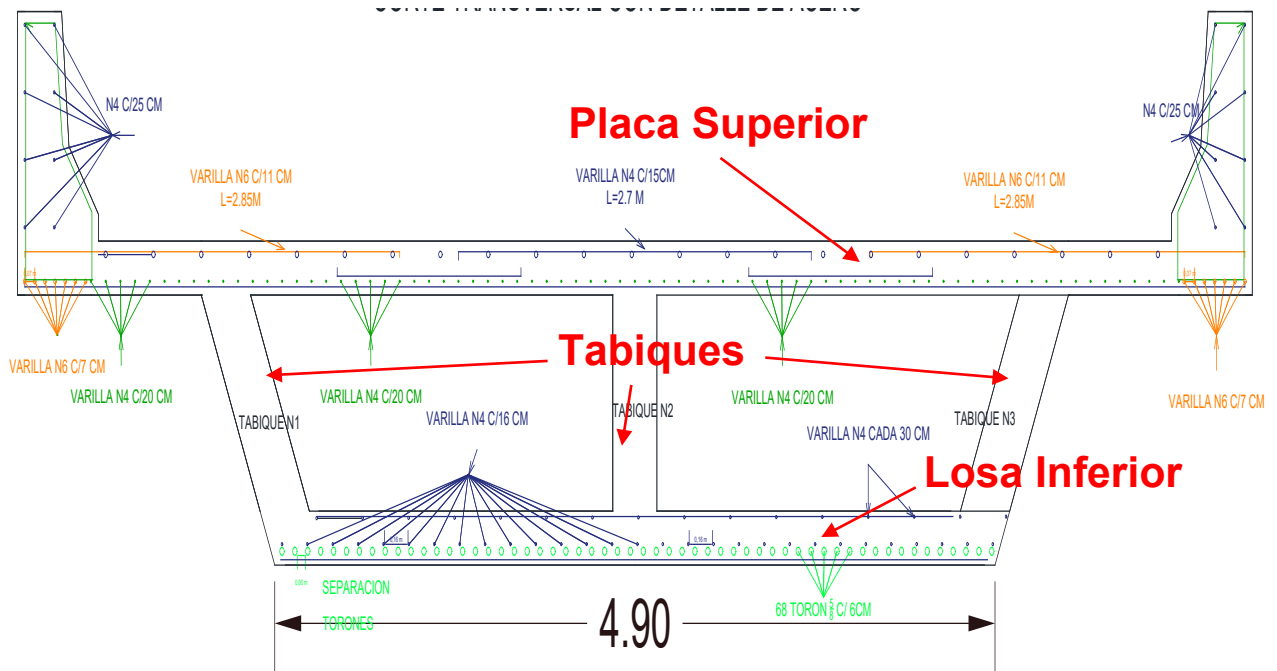


Figura 65 Plano detalle de acero de refuerzo de placa superior y losa inferior para dovela prefabricada de concreto.

Fuente: Secretaria de movilidad y transporte del estado de Nuevo León.

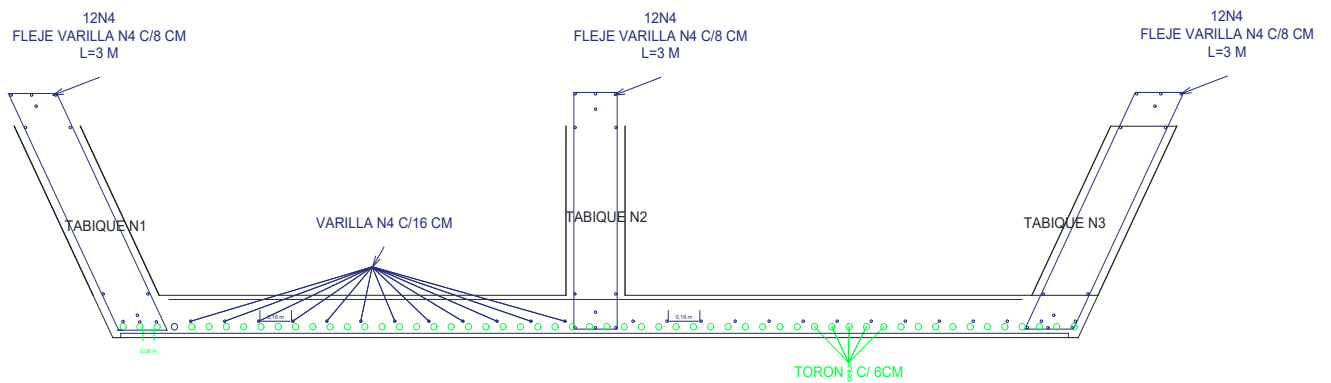


Figura 66: Plano detalle de acero de refuerzo para tabiques de dovela prefabricada de concreto.

Fuente: Secretaria de movilidad y transporte del estado de Nuevo León.

4.2.1.2.1 Acero Placa superior

Se presentan las siguientes tablas con los detalles del cálculo del acero de refuerzo para la placa superior:

Tabla 15 Tabla de cálculo de acero de refuerzo longitudinal para placa superior de dovela prefabricada de concreto.

ACERO DE PLACA LONGITUDINAL						
Detalle	Varilla	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ACERO SUPERIOR N6	6	19,1	2,85	2,235	46	293,01
ACERO SUPERIOR N4	4	12,7	2,7	0,994	34	91,25
ACERO SUPERIOR N6	6	19,1	2,85	2,235	46	293,01
ACERO INFERIOR N4	4	12,7	1,3	0,994	34	43,93
ACERO INFERIOR N4	4	12,7	1,3	0,994	34	43,93
ACERO INFERIOR N4	4	12,7	8,3	0,994	34	280,51
TOTAL 1						1045,64

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16 Tabla de cálculo de acero de refuerzo transversal para placa superior de dovela prefabricada de concreto.

ACERO DE PLACA TRANSVERSAL						
Detalle	Varilla	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ACERO SUPERIOR N4	4	12,7	5	0,994	34	168,98
ACERO SUPERIOR N6	6	19,1	5	2,235	7	78,23
ACERO SUPERIOR N6	6	19,1	5	2,235	7	78,23
ACERO INFERIOR N4	4	12,7	5	0,994	42	208,74
TOTAL 2						534,17

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2.2 Acero Losa inferior

Se presentan las siguientes tablas con los detalles del cálculo del acero del refuerzo para la losa inferior:

Tabla 17 Tabla de cálculo de acero de refuerzo longitudinal para losa inferior de dovela prefabricada de concreto.

ACERO DE LOSA INFERIOR LONGITUDINAL						
Detalle	Varilla	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ACERO SUPERIOR N4	4	12,7	4,3	0,994	34	145,32
ACERO INFERIOR N4	4	12,7	4,8	0,994	34	162,22
TOTAL 3						307,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18 Tabla de cálculo de acero de refuerzo transversal para losa inferior de dovela prefabricada de concreto.

ACERO DE LOSA INFERIOR TRANSVERSAL						
Detalle	Varilla	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ACERO SUPERIOR N4	4	12,7	5	0,994	27	134,19
ACERO INFERIOR N4	4	12,7	5	0,994	30	149,10
TOTAL 4						283,29

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2.3 Acero Tabiques

Se presentan las siguientes tablas con los detalles del cálculo del acero de refuerzo para los tabiques:

Tabla 19 Tabla de cálculo de acero de refuerzo longitudinal para tabiques de dovela prefabricada de concreto.

ACERO DE TABIQUE LONGITUDINAL						
Detalle	Varilla	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ACERO IZQUIERDO N4	4	12,7	3	0,994	63	187,87
ACERO CENTRAL N4	4	12,7	2,68	0,994	63	167,83
ACERO DERECHO N4	4	12,7	3	0,994	63	187,87
TOTAL 5						543,56

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20 Tabla de cálculo de acero de refuerzo transversal para tabiques de dovela prefabricada de concreto.

ACERO DE TABIQUE TRANSVERSAL						
Detalle	Varilla	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ACERO IZQUIERDO N4	4	12,7	5	0,994	14	69,58
ACERO CENTRAL N4	4	12,7	5	0,994	14	69,58
ACERO DERECHO N4	4	12,7	5	0,994	14	69,58
TOTAL 6						208,74

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2.4 Acero total en dovela prefabricada de concreto.

Para obtener el total de acero de refuerzo de la dovela se procede a sumar los totales obtenidos anteriormente. Por lo cual, se obtiene la siguiente fórmula:

$$W_{ad} = TOTAL1 + TOTAL2 + TOTAL3 + TOTAL4 + TOTAL5 + TOTAL6$$

(4.1)

Donde:

W_{ad}= Peso del acero de refuerzo de la dovela.

Entonces:

$$Wad = 2922.95 \text{ Kg}$$

$$Wad = 2.92 \text{ Ton}$$

Para poder calcular la cantidad de acero por metro lineal se utiliza la fórmula 3.7

$$Pud = \frac{Wad}{Ld}$$

$$Pud = \frac{2.92}{5}$$

$$Pud = 0.59 \frac{\text{Ton}}{\text{m}}$$

4.2.1.3 Volumen de concreto en la superestructura

Dado el plano de una dovela que se implementó en la construcción de las anteriores líneas del metro de monterrey se procese a sacar el volumen de concreto de la dovela, la cual, posee 5 metros de longitud.

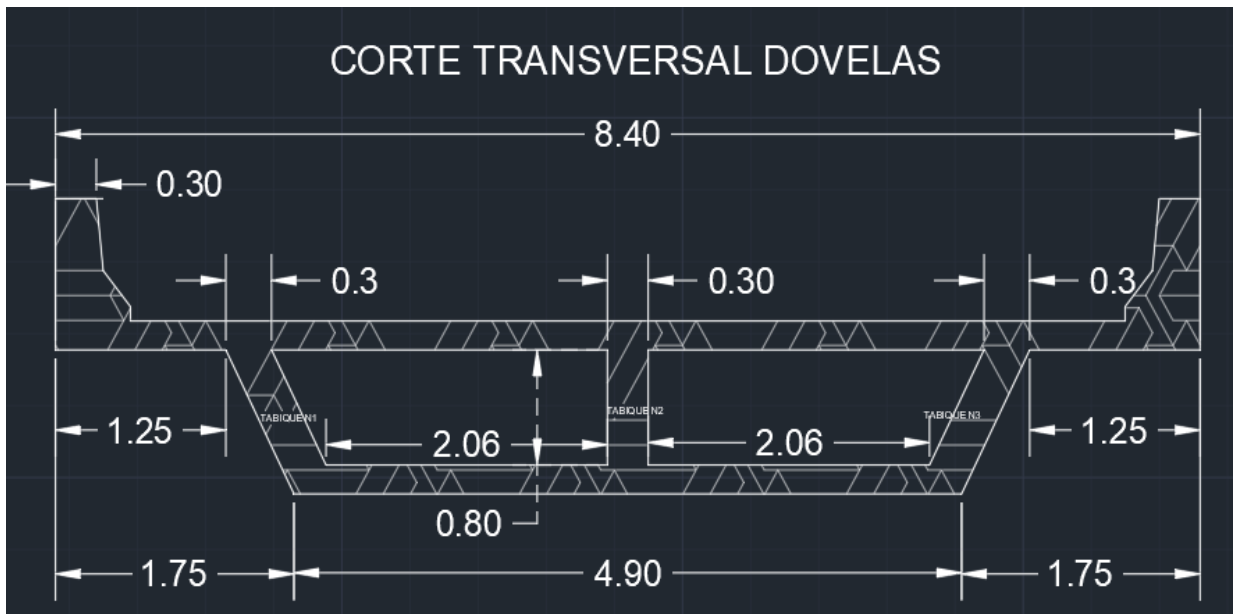


Figura 67 Gráfica de las dovelas prefabricadas utilizadas para la construcción de las líneas del metro de Monterrey.

Fuente: Secretaria de movilidad y transporte del estado de Nuevo León.

Dada la sección transversal a escala de las dovelas implementadas en la construcción del metro de Monterrey, se procede a determinar el área mediante las propiedades del bloque en AutoCAD.

La propiedad del bloque solido da como resultado un área 7.74m²

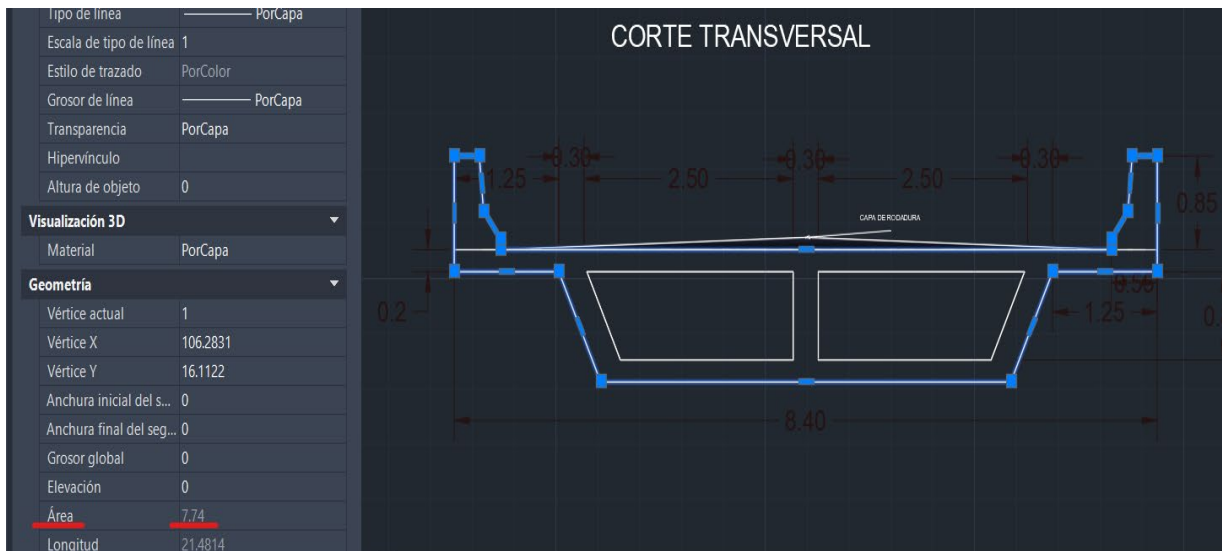


Figura 68 Imagen representativa del área del bloque solido de la dovela en AutoCAD.

Fuente: Secretaria de movilidad y transporte del estado de Nuevo León.

El área hueca en la dovela da como resultado un área de 1.8m².

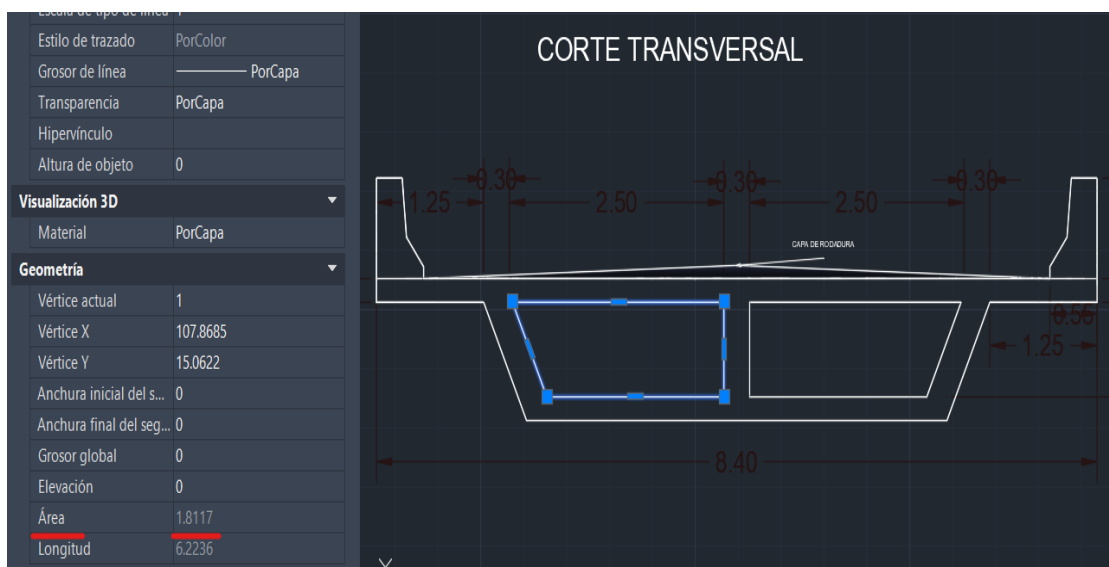


Figura 69 Imagen representativa del área del hueco entre las dovelas.

Fuente: Secretaria de movilidad y transporte del estado de Nuevo León.

Por lo cual se tiene la siguiente formula:

$$Ad = Ab - 2 * Ah \quad (4.2)$$

Donde:

Ad= Área dovela.

Ab= Área del bloque.

Ah= Área del hueco.

Entonces:

$$Ad = 7.74 - 2 * 1.8$$

$$Ad = 4.14 \text{ m}^2$$

Se omite el área de los ductos para el post-tensado ya que estos se van a rellenar de concreto después de su implementación.

Para calcular el volumen de cada dovela se procede a multiplicar e área de la dovela por su longitud.

$$Vd = Ad * Ld \quad (4.3)$$

Donde:

Vd = Volumen de dovela.

Ld= Longitud de dovela.

Entonces:

$$Vd = 4.14 * 5$$

$$Vd = 20.7 \text{ m}^3$$

Una vez determinado el volumen de la dovela se procede a utilizar la ecuación 3.9 para poder calcular el volumen de concreto por metro lineal de la superestructura.

$$Vud = \frac{Vd}{Ld}$$

Por lo tanto:

$$Vud = \frac{20.7 \text{ m}^3}{5 \text{ m}}$$

$$Vud = 4.14 \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$$

4.2.2 Análisis para el sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto

4.2.2.1 Costo por kilómetro lineal del sistema de metro

Las nuevas líneas del metro de Monterrey es un proyecto el cual está siendo gestionado por la empresa constructora MotaEngil-México.

Este proyecto cuenta con una longitud de vías de metro total de 36 kilómetros y el costo que se estableció al momento de la adjudicación fue de 36.531'000.000,00 millones de pesos mexicanos. El cambio de moneda peso mexicano – dólar americano al momento de la adjudicación fue de 20.5 pesos mexicanos por 1 dólar americanos. Por lo tanto, el costo total del proyecto de las nuevas líneas del metro de Monterrey fue de \$1.782'000.000,00 USD.

$$CP = \frac{1782 \text{ MUSD}}{36 \text{ km}}$$

$$CP = 49.5 \frac{\text{MUSD}}{\text{Km}}$$

El costo por kilómetro lineal de sistema de metro está definido por la ecuación 3.5.

$$C_{prom} = \frac{\sum CP}{n}$$

Donde:

n = 1

Por lo tanto:

$$C_{prom} = 49.5 \frac{MUSD}{Km}$$

4.2.2.2 Cantidad de acero de refuerzo en la superestructura

En base al plano 2 presentado en los anexos, se procede a calcular el acero de refuerzo longitudinal y transversal de la viga prefabricada de concreto para monorriel.

4.2.2.2.1 Acero longitudinal

Se calcula el acero longitudinal de la sección 2 de la viga, el cálculo se lo realiza mediante la siguiente tabla:

Tabla 21 Acero de refuerzo longitudinal de la viga prefabricada de concreto para monorriel.

SECCION 2 ACERO LONGITUDINAL					
Detalle	Varilla	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ACERO SUPERIOR N1	8	22	3,973	4	349,62
ACERO SUPERIOR N4	5	22	1,552	4	136,58
ACERO LATERAL N2	6	22	2,235	28	1376,76
ACERO INFERIOR N4	5	22	1,552	4	136,58
ACERO INFERIOR N4	8	22	3,973	4	349,62
TOTAL 1					2349,16

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.2.2 Acero transversal

Se calcula el acero longitudinal de la sección 6,3 y2 de la viga, el cálculo se lo realiza mediante la siguiente tabla:

Tabla 22 Acero de refuerzo transversal sección 6 viga de monorriel

SECCION 6 ACERO TRANSVERSAL					
Detalle	Varilla	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ESTRIBO	5	4,94	1,552	31	237,67
GRAPA	5	2,87	1,552	31	138,08
VARILLA ANCLAJE	5	1	1,552	4	6,21
TOTAL 2					381,96

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23 Acero de refuerzo transversal sección 3 viga de monorriel

SECCION 3 ACERO TRANSVERSAL					
Detalle	Varilla	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ESTRIBO1	4	3,89	0,994	39	150,80
ESTRIBO2	4	3,89	0,994	39	150,80
GANCHO1	4	3,23	0,994	39	125,21
GANCHO2	4	2,69	0,994	39	104,28
GANCHO3	4	2,21	0,994	39	85,67
GANCHO4	4	1,73	0,994	39	67,07
GANCHO5	4	1,25	0,994	39	48,46
GANCHO6	4	0,93	0,994	39	36,05
TOTAL 3					768,34

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24 Acero de refuerzo transversal sección 2 viga de monorriel

SECCION 2 ACERO TRANSVERSAL					
Detalle	Varilla	Longitud (m)	Peso (kg/m)	Cantidad	Total (kg)
ESTRIBO1	4	3,89	0,994	10	38,67
ESTRIBO2	4	3,89	0,994	10	38,67
GANCHO1	4	3,23	0,994	10	32,11
GANCHO2	4	0,93	0,994	10	9,24
TOTAL 4					118,68

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.2.3 Acero de refuerzo total de la superestructura del sistema de metro por metro lineal

Para calcular el total de acero de refuerzo por metro lineal de la superestructura del sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto se utiliza la fórmula 3.6.

$$P_{uv} = \frac{W_{av}}{L_v}$$

Donde:

$$W_{av} = 2 * (TOTAL1 + 2 * TOTAL2 + 2 * TOTAL3 + 2 * TOTAL4)$$

$$W_{av} = 2 * (2349.16 + 2(381.96) + 2(768.34) + 2(118.68))$$

$$W_{av} = 9774.27 \text{ Kg}$$

$$W_{av} = 9.775 \text{ Ton}$$

Entonces:

$$L_v = 21\text{m}$$

$$P_{uv} = \frac{97.75}{21}$$

$$P_{uv} = 0.47 \frac{\text{Ton}}{\text{m}}$$

4.2.2.3 Volumen de concreto en la superestructura

La figura 71 muestra un corte longitudinal de una de las vigas de menor luz que se van implementar en la construcción del monorriel para el metro de Monterrey.

La viga prefabricada de concreto cuenta un con un sistema de reducción de peso con poliestireno de alta densidad, así como se muestra en la figura 63.

La viga prefabricada es de tipo peraltada con altura de 2.20 metros a los extremos y de 1.60 metros en el resto de su longitud. Para el ancho de la viga es constante y posee una medida de 0.69 metros.

Dado el plano proporcionado a escala 1:10 en formato de AutoCAD se procede a calcular el área del bloque.

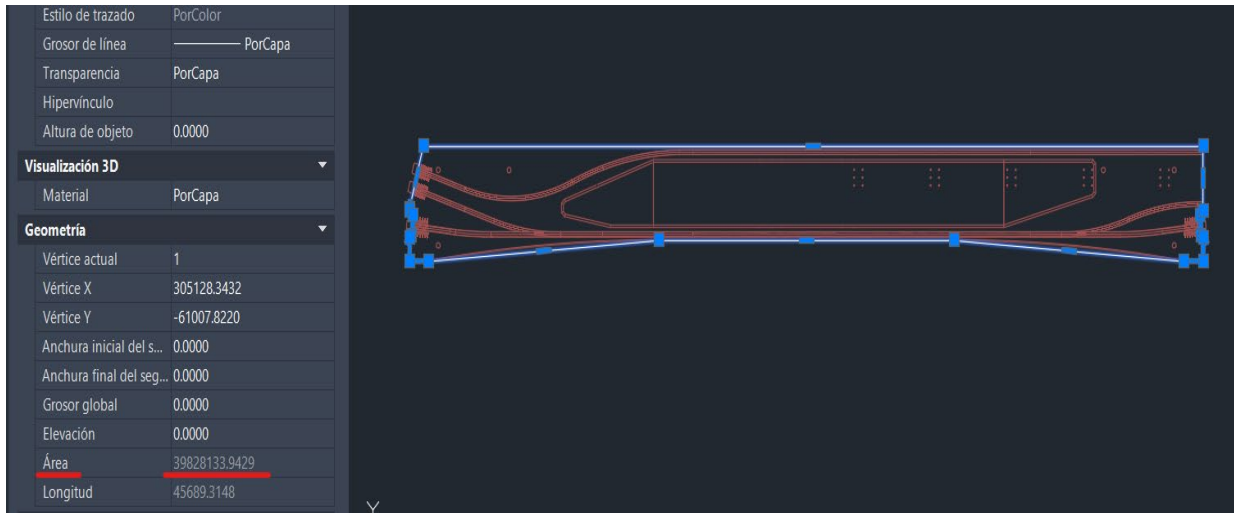


Figura 70 Imagen representativa del área del bloque de viga en AutoCAD.

Fuente: MotaEngil-Mexico.

Dado el área del bloque en AutoCAD a escala 1:100 se tiene que el área del bloque es de 39828133.9429 mm² que da como resultado 39.82 m².

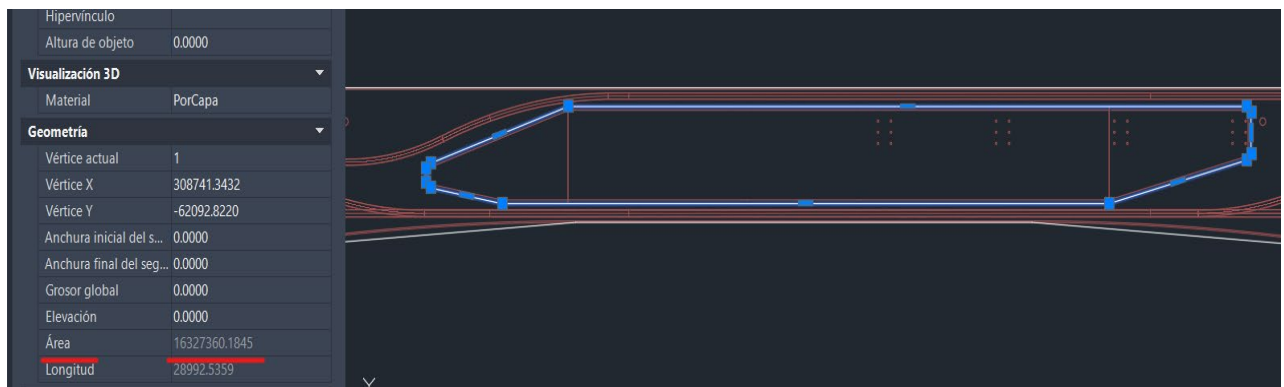


Figura 71 Imagen representativa del área del poliestireno expandido de alta densidad en la viga prefabricada.

Fuente: MotaEngil-Mexico.

Dado el área del poliestireno expandido de alta densidad por AutoCAD con una escala 1:100 se obtuvo que el área es de 16327360.1845 mm² que da como resultado 16.32 m².

Entonces:

$$Vb = Ab * Bb \quad (4.4)$$

Donde:

Vb = Volumen bloque

Ab= Área bloque

Bb= Ancho bloque = 1m

Entonces:

$$Vb = 39.82 * 0,69$$

$$Vb = 27.5 \text{ m}^3$$

Se omite el volumen de los ductos para el post-tensado ya que estos se van a rellenar de concreto después de su implementación.

Para calcular el volumen de la viga se procede a calcular el volumen del poliestireno expandido de alta densidad y restarlo del Vb.

$$Vp = Ap * Bp \quad (4.5)$$

Donde:

Vp = Volumen poliestireno expandido.

Ap= Área poliestireno expandido.

Bp= Ancho poliestireno = 0.51 m.

Entonces:

$$Vp = 16.32 * 0.51$$

$$Vp = 8.32 \text{ m}^3$$

Una vez determinado el Vb y el Vp se procede a calcular el volumen de concreto de la viga.

$$Vv = Vb - Vp \quad (4.6)$$

Donde:

V_v = Volumen viga.

Entonces:

$$V_v = 27.50 - 8.32$$

$$V_v = 19.18 \text{ m}^3$$

El volumen de concreto por metro lineal está dado por la fórmula 3.8.

$$V_{uv} = \frac{V_v}{L_v}$$

Donde:

L_v = 21 metros.

Entonces:

$$V_{uv} = \frac{19.18 * 2}{21}$$

$$V_{uv} = 1.83 \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$$

4.3 Análisis del impacto ambiental

Como ya fue definido en el capítulo 3 el análisis del impacto ambiental se realizará en 3 subcategorías. La contaminación del aire, la contaminación acústica y el impacto a la imagen urbana.

4.3.1 Análisis para el sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto

4.3.1.1 Contaminación del aire

Para calcular la contaminación del aire producida por la implementación del acero de refuerzo y el concreto en la superestructura del sistema de metro se utiliza la ecuación 3.10.

$$TCO_2 = Lp * (Ta + Tc)$$

Donde:

$$Lp = 36000 \text{ m}$$

El acero de refuerzo posee una emisión de CO₂ de 1400 TonCO₂/Ton y el hormigón de 35 MPA, el cual se utiliza para la construcción de las dovelas, posee una emisión de CO₂ de 120 TonCO₂/Ton (Fernández Valdivieso, 2016).

Dado que $Vud = 4.14 \text{ m}^3/\text{m}$ y $Pud = 0.59 \text{ Ton}/\text{m}$, se procede a calcular la emisión de CO₂ por metro lineal.

Emisión de CO₂ del concreto por metro lineal:

$$\begin{aligned} Tc &= Vud * \gamma_c * 120 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}} \\ Tc &= 4.14 \frac{\text{m}^3}{\text{m}} * 2.3 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 120 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}} \\ Tc &= 4.14 \frac{\text{m}^3}{\text{m}} * 2.3 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 120 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}} \\ Tc &= 1142 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{m}} \end{aligned}$$

Emisión de CO₂ del acero de refuerzo por metro lineal:

$$Ta = Pud * 1400 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}}$$

$$T_a = 0.59 \frac{\text{Ton}}{m} * 1400 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}}$$

$$T_a = 673.78 \frac{\text{Ton Co}_2}{m}$$

Una vez determinado T_a y T_c , se procede a calcular TCO_2 :

$$TCO_2 = 36000m * (673.78 \frac{\text{Ton Co}_2}{m} + 1142 \frac{\text{Ton Co}_2}{m})$$

$$TCO_2 = 65.36 \times 10^6 \text{ Ton Co}_2$$

4.3.1.2 Contaminación acústica

Para determinar la contaminación acústica de un sistema de metro duorriel tren ligero tipo viaducto se realiza el cálculo promedio del ruido que producen varios sistemas de metro similares en la ciudad de México para posteriormente compararlos con la norma de OMS y la norma Mexicana a ver si se cumple.

La OMS establece que una persona puede tolerar hasta 70 dB sin que el oído humano pueda sufrir daños temporales o permanentes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017). Mientras que, la normativa mexicana NOM-079-SEMARNAT-1994 establece que para vehículos cuyo peso bruto esta entre los 3000 y 10000 Kg el nivel máximo permitido de ruido que se produce por estos es 81 dB (Gestión ambiental Mexicana, 1995).

Un estudio realizado en la ciudad de México determino los niveles de ruido que producen diferentes estaciones de metro las cuales fueron construidas bajo el sistema de metro tren ligero tipo viaducto.

ID	Brigada	Estación	Línea	dB pico	dB no pico
1	1	Pantitlán	1	73.2	73.3
2	1	Zaragoza	1	72.8	78.9
3	1	Pantitlán	9	74	74.7
4	1	Puebla	9	77.5	77.8
5	1	Guelatao	A	80	79.5
6	1	Santa Marta	A	75.6	73.5
7	1	Los Reyes	A	71.7	71.6
8	1	La Paz	A	77.4	74.8
9	1	Pantitlán	A	73.1	74.4
10	2	La Raza	3	79.2	79.3
11	2	*Valle Gómez	5	77.1	75.6
12	2	La Raza	5	80.3	76.8
13	2	Lagunilla	B	77.5	77.9
14	2	Buenavista	B	73.6	78.3
15	2	Melchor Múzquiz	B	79.8	79.1
16	2	Tecnológico (Ecatepec)	B	77.1	77.1
17	2	Ciudad Azteca	B	77.9	77
18	3	Indios Verdes	3	75.7	76.3
19	3	Deportivo 18 de Marzo	3	74.5	76.1
20	3	Terminal Autobuses del Norte	5	76.1	72.5
21	3	Politécnico	5	73.1	74.4
22	3	La Villa - Basílica	6	72.4	71.4
23	3	*Deportivo 18 de Marzo	6	70.1	71.1
24	3	El Rosario	6	72	72
25	3	El Rosario	7	67.6	69.7
26	4	Insurgentes	1	79.8	82.9
27	4	Chapultepec	1	75.8	81.9
28	4	Observatorio	1	78.9	82
29	4	Cuatro Caminos	2	77	75.8
30	4	Tacuba	2	85.8	78.7
31	4	Polanco	7	83	82.6
32	4	Barranca del Muerto	7	79.3	76.2
33	4	Tacubaya	9	79	80.4
34	5	Hidalgo	2	78.8	76.2
35	5	Zócalo	2	79.8	79.8
36	5	Taxqueña	2	77.4	75.2
37	5	Chabacano	2	76.2	74.7
38	5	Chilpancingo	9	78.8	79.5
39	5	San Juan de Letrán	8	77.3	79.5
40	5	Zapata	3	75.3	78.1

Figura 72 Cantidad de ruido producido en diferentes líneas de la ciudad de México.

Fuente: (Contreras Lee, y otros, 2009).

ID	Brigada	Estación	Línea	dB pico	dB no pico
41	5	Universidad	3	71.6	72.5
42	6	Martín Carrera	4	69.5	68.7
43	6	Canal del Norte	4	70.2	70.9
44	6	Jamaica	4	62.3	69.8
45	6	*Santa Anita	4	70.8	70
46	6	Mixhuca	9	77.4	78.4
47	6	Coyuya	8	82.6	84
48	6	Constitución de 1917	8	78.7	78.2
49	6	Martín Carrera	6	69.8	67.7

Figura 73 Cantidad de ruido producido en diferentes líneas de la ciudad de México.

Fuente: (Contreras Lee, y otros, 2009).

Dado los datos de ruido producidos en las líneas del metro de la ciudad de México se procede a calcular R_p utilizando la ecuación 3.11.

$$R_p = \frac{\sum R_s}{x}$$

Donde:

R_s = Se utilizarán los datos de ruido producido en la hora pico del sistema de metro.

$x=49$

Reemplazando:

$$R_p = \frac{3726.8}{49}$$

$$R_p = 76.05 \text{ dB}$$

4.3.1.3 Impacto a la imagen urbana

El impacto a la imagen urbana se obtiene por la medición de la intrusión visual de la superficie en m^2 que ocupa el área en planta más el área en corte longitudinal de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz. Esta superficie está dada por la fórmula 3.12.

$$A_i = A_c + A_p$$

Cálculo área en planta:

$$A_p = B_d * L_m$$

Donde:

B_d = Ancho mayor dovela = 8.40 m.

L_m = Longitud pórtico = 30 m

$$A_p = 8.4 * 30$$

$$A_p = 252 \text{ m}^2$$

Cálculo área en corte:

$$A_c = h_d * L_m$$

Donde:

h_d = Altura dovela = 2 m.

L_m = Longitud pórtico = 30 m

$$A_c = 2 * 30$$

$$A_c = 60 \text{ m}^2$$

Cálculo área de intrusión visual:

$$A_i = A_c + A_p$$

$$A_i = 60 + 252$$

$$A_i = 312 \text{ m}^2$$

4.3.2 Análisis para el sistema de metro tipo monorriel sobre viga prefabricada de concreto

4.3.2.1 Contaminación del aire

Para calcular la contaminación del aire producida por la implementación del acero de refuerzo y el concreto en la superestructura del sistema de metro se utiliza la ecuación 3.10.

$$TCO_2 = Lp * (Ta + Tc)$$

Donde:

$$Lp = 36000 \text{ m}$$

El acero de refuerzo posee una emisión de CO₂ de 1400 TonCO₂/Ton y el hormigón de 35 MPA, el cual se utilizó en la fabricación de la viga, posee una emisión de CO₂ de 120 TonCO₂/Ton (Fernández Valdivieso, 2016).

Dado que $V_{uv} = 1.83 \text{ m}^3/\text{m}$ y $P_{uv} = 0.47 \text{ Ton}/\text{m}$, se procede a calcular la emisión de CO₂ por metro lineal.

Emisión de CO₂ del concreto por metro lineal:

$$Tc = V_{uv} * \gamma_c * 120 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}}$$
$$Tc = 1.83 \frac{\text{m}^3}{\text{m}} * 2.3 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 120 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}}$$
$$Tc = 505.08 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{m}}$$

Emisión de CO₂ del acero de refuerzo por metro lineal:

$$Ta = P_{ud} * 1400 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}}$$
$$Ta = 0.47 \frac{\text{Ton}}{\text{m}} * 1400 \frac{\text{Ton Co}_2}{\text{Ton}}$$

$$T_a = 658 \frac{\text{Ton Co}_2}{m}$$

Una vez determinado T_a y T_c , se procede a calcular TCO_2 :

$$TCO_2 = 36000m * (658 \frac{\text{Ton Co}_2}{m} + 505.08 \frac{\text{Ton Co}_2}{m})$$

$$TCO_2 = 41.87 \times 10^6 \text{ Ton Co}_2$$

4.3.2.2 Contaminación acústica

Para determinar la contaminación acústica del sistema de metro monorriel sobre viga se realiza el cálculo promedio del ruido que producen varios sistemas de metro similares en diferentes ciudades del mundo, para posteriormente compararlos con la norma de OMS y la norma Mexicana a ver si se cumple.

La OMS establece que una persona puede tolerar hasta 70 dB sin que el oído humano pueda sufrir daños temporales o permanentes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017). Mientras que, la normativa mexicana NOM-079-SEMARNAT-1994 establece que para vehículos cuyo peso bruto esta entre los 3000 y 10000 Kg el nivel máximo permitido de ruido que se produce por estos es 81 dB (Gestión ambiental Mexicana, 1995).

Un estudio realizado en la ciudad de Kuala Lumpur - Malasia, refleja datos de emisión de ruido producido en dos estaciones de un sistema de metro monorriel sobre viga. La estación Maharajalela presenta una emisión de ruido promedio de 73 dB. Mientras que la estación Titiwangsa presenta una emisión de ruido promedio de 74.5 dB (Bin Alias, 2015).

Otro estudio realizado en la ciudad de Kitakyushu – Japón, refleja que su sistema de metro monorriel sobre viga produce una emisión de ruido promedio de 75 dB (Muhammad Das, Yukawa, Amiruddin, Riza Atiq, & Mohd Azizul, 2013).

Dado los datos de ruido producidos en los sistemas de metro monorriel sobre viga se procede a calcular R_p utilizando la ecuación 3.11.

$$Rp = \frac{\sum Rs}{x}$$

Donde:

$$x=3$$

Reemplazando:

$$Rp = \frac{73 + 74.5 + 75}{3}$$
$$Rp = 74.2 \text{ dB}$$

4.3.2.3 Impacto a la imagen urbana

El impacto a la imagen urbana se obtiene por la medición de la intrusión visual de la superficie en m² que ocupa el área en planta más el área en corte longitudinal de la superestructura de un pórtico de 30 metros de luz. Esta superficie está dada por la fórmula 3.12.

$$Ai = Ac + Ap$$

Cálculo área en planta:

$$Ap = 2 * Bd * Lm$$

Donde:

Bd = Ancho de la viga = 0.7 m.

Lm = Longitud pórtico = 30 m

$$Ap = 2 * 0.7 * 30$$

$$Ap = 42 \text{ m}^2$$

Cálculo área en corte:

$$Ac = hv * Lm$$

Donde:

hv = Altura viga = 2.20 m.

Lm = Longitud pórtico = 30 m

$$Ac = 2.20 * 30$$

$$Ac = 66 \text{ m}^2$$

Cálculo área de intrusión visual:

$$Ai = Ac + Ap$$

$$Ai = 66 + 42$$

$$Ai = 108 \text{ m}^2$$

4.4 Evaluación de los sistemas de metro duorriel tren ligero tipo viaducto por dovelas prefabricadas de concreto versus el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto

Una vez realizado las evaluaciones para cada sistema de metro en el ámbito económico, ambiental y en los procesos constructivos, se procede a realizar la siguiente tabla. Donde se resumirán los resultados obtenidos en las evaluaciones, con los cuales, se obtendrá el porcentaje de diferencia entre ambos para así poder puntuar cada sistema de metro.

Tabla 25 Tabla comparativa sistemas de metro

No	EVALUACION	SISTEMA DE METRO TIPO MONORRIEL SOBRE VIGA PREFABRICADA DE CONCRETO	SISTEMA DE METRO TIPO VIADUCTO SUSPENDIDO POR DOVELAS SUCESIVAS PREFABRICADAS DE CONCRETO	% DIFERENCIA	PUNTAJE SISTEMA DE METRO CONVENCIONAL DUORRIEL	PUNTAJE SISTEMA DE METRO MONORRIEL
1. PROCESOS CONSTRUCTIVOS (15 PUNTOS)						
1.1	Tiempo de construcción de la superestructura (días)	3	8,5	64,71	0	5
1.2	Equipos para la construcción de la superestructura (U)	16	24	33,33	1	4
1.3	Materiales para postensado (U)	40	220	81,82	0	5
2. AMBITO ECONOMICO (50 PUNTOS)						
2.1	Costo por kilómetro de sistema de metro (MUSD/KM)	49,5	67	26,12	5	25
2.2	Acero de refuerzo en la superestructura (TON/M)	0,47	0,59	20,34	4	6

2.3	Volumen de concreto en la superestructura (M3/M)	1,83	4,14	55,80	0	10
3. IMPACTO AMBIENTAL (20 PUNTOS)						
3.1	Contaminación del aire (MTon Co2)	41,87	65,36	35,94	1	4
3.2	Contaminación acústica (dB)	74,2	76,05	N/A	5	5
3.3	Impacto a la imagen urbana (m2)	108	312	65,38	0	5
TOTAL PUNTAJE (80 PUNTOS)					16	69

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el puntaje para cada sistema de metro se obtiene que el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto es el óptimo a implementarse en las nuevas líneas del metro de Monterrey. A continuación, se procede a realizar el análisis de sostenibilidad de este sistema de metro.

4.5 Análisis de sostenibilidad

Para el análisis de sostenibilidad se presenta la siguiente gráfica mediante la cual se presenta ciertos indicadores de un sistema de transporte público sostenible.

Este análisis se hará en relación al sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto versus el sistema de metro tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto.

Objective	Indicator
Economic sustainability	
Accessibility	
Commuting	Average commute travel time
Land use mix	Numbers of job opportunities and commercial services within 30 min travel distance of residents
Smart growth	Implementation of policy and planning practices that lead to more accessible, clustered, mixed, multimodal development
Transport diversity	Mode split: portion of travel made by walking, cycling, ride share, public transit, and telework
Affordability	Portion of household expenditures devoted to transport by 20% lowest income households
Facility costs	Per capita expenditures on roads, traffic services, and parking facilities
Freight efficiency	Speed and affordability of freight and commercial transport
Planning	Degree to which transport institutions reflect least-cost planning and investment practices
Social sustainability	
Safety	Per capita crash disabilities and fatalities
Health and fitness	Portion of population that regularly walks and cycles
Community	Degree to which transport activities increase community livability (local environmental quality)
Equity	
Fairness	Degree to which prices reflect full costs unless a subsidy is specifically justified
Nondrivers	Quality of accessibility and transport services for nondrivers
Disabilities	Quality of transportation facilities and services for people with disabilities (e.g., wheelchair users, people with visual impairments)
Nonmotorized transport planning	Degree to which impacts on nonmotorized transport are considered in transportation modeling and planning
Citizen involvement	Public involvement in transport planning process
Environmental sustainability	
Climate-change emissions	Per capita fossil fuel consumption and emissions of CO ₂ and other climate-change emissions
Other air pollution	Per capita emissions of "conventional" air pollutants (CO, VOC, NO _x , particulates, etc.)
Noise pollution	Portion of population exposed to high levels of traffic noise
Water pollution	Per capita vehicle fluid losses
Land use impacts	Per capita land devoted to transportation facilities
Habitat protection	Preservation of wildlife habitat (wetlands, forests, etc.)
Resource efficiency	Nonrenewable resource consumption in the production and use of vehicle and transport facilities

Figura 74 Gráfica de los indicadores de sostenibilidad en un sistema de transporte urbano.

Fuente: (El-Diraby, Abdulhai, & Pramod, 2005).

4.5.1 Sostenibilidad económica

Uno de los principales factores de sostenibilidad económica se obtiene el

- **Tiempo de recorrido del sistema de metro** las nuevas líneas del metro atraviesan zonas de gran tráfico vehicular donde en la hora pico se llega a una

velocidad máxima de 30 km/hr (EL CEO, 2023). Mientras que el metro monorriel transita libremente sin ninguna interferencia a una velocidad promedio de 80 km/hr.

- Otro indicador importante es **la asequibilidad** de este medio de transporte, ya que, el costo promedio del boleto del sistema de metro es de 9.50 pesos mexicanos. Mientras que la optar por un servicio de transporte privado o taxi oscila el precio entre los 50 a 250 pesos mexicanos.

4.5.2 Sostenibilidad social

Entre los principales indicadores de sostenibilidad social se tiene la equidad y la participación ciudadana.

- **En cuanto al indicador de equidad** se tiene que todos los sistemas de transporte público en México deben cumplir con la norma UNE 170001, la cual establece que todas las edificaciones y servicios deben contar con accesos para personas con capacidad reducida.
- **En el indicador de participación ciudadana** se tiene que las nuevas líneas del metro van a atravesar los municipios periféricos del área metropolitana de Monterrey lo cual representa una participación de 2.9 millones de habitantes.

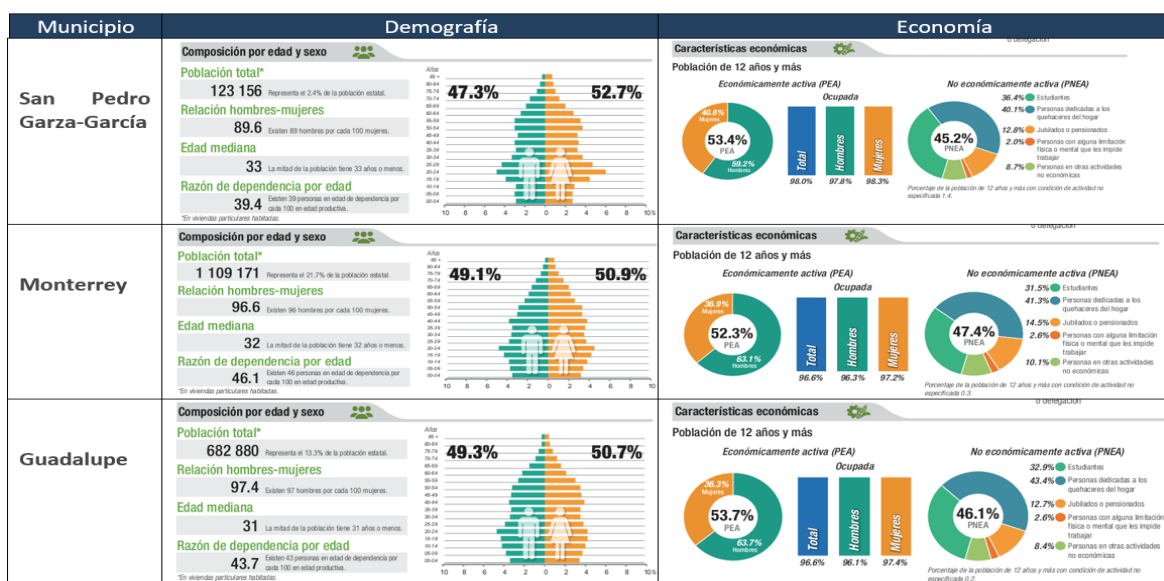


Figura 75 Distribución demográfica de los municipios de Monterrey.

Fuente: MotaEngil-México.

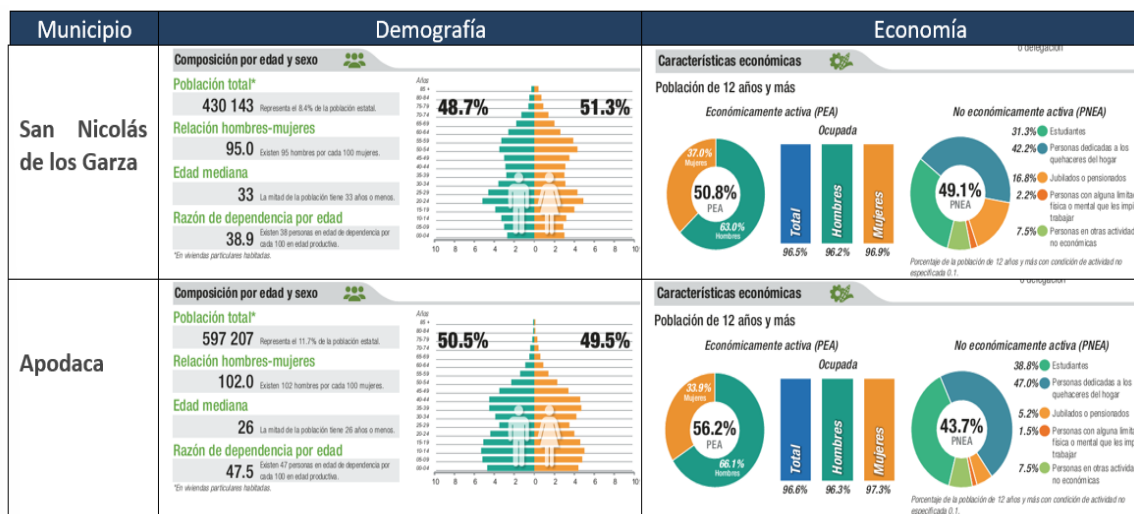


Figura 76 Distribución demográfica de los municipios de Monterrey.

Fuente: MotaEngil-México.

4.5.3 Sostenibilidad ambiental

Entre los principales factores de sostenibilidad ambiental se tiene las emisiones de cambio climático, la contaminación por ruido y el impacto al uso de suelo.

- En el indicador de **emisiones de cambio climático** se obtiene que el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto produce un 36% menos emisiones de CO₂ en la construcción de la superestructura del sistema de metro en comparación al sistema de metro duorriel tren ligero tipo viaducto por dovelas sucesivas prefabricadas de concreto.
- En el indicador de **contaminación por ruido** se determinó que el sistema de metro monorriel cumple con la norma mexicana de emisiones de ruido para transporte de pasajeros NOM-079-SEMARNAT-1994.
- En el indicador de **impacto al uso de suelo** se obtuvo que el área de intrusión visual del sistema de metro monorriel es menor al del sistema de metro convencional duorriel tren ligero tipo viaducto.

4.6 Discusión de resultados

Dado el análisis a los sistemas de metro se obtiene que el sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto es mejor en los tres ámbitos de evaluación y este sistema de metro refleja los siguientes resultados:

4.6.1 En los procesos constructivos:

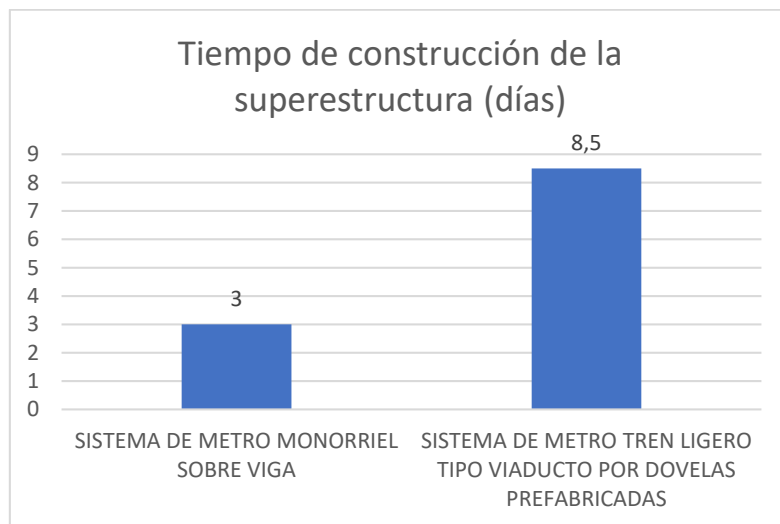


Figura 77 Gráfica de los resultados de la evaluación 1.1 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboración propia.

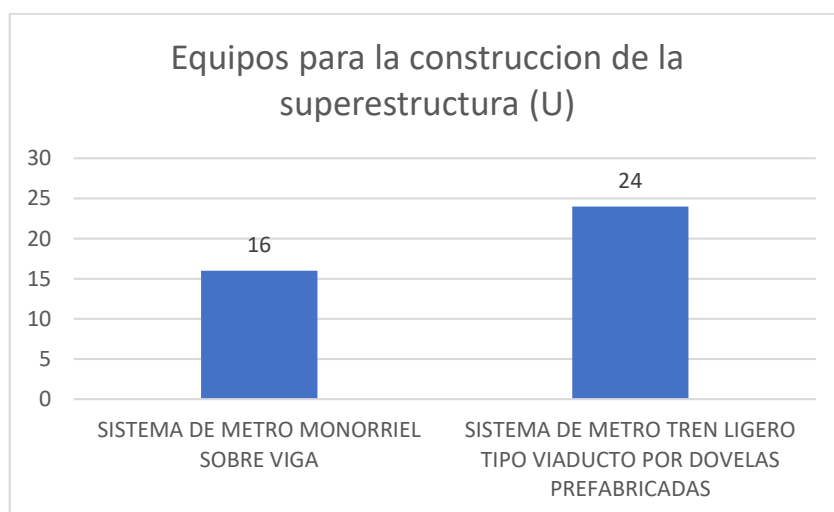


Figura 78 Gráfica de los resultados de la evaluación 1.2 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboración propia.

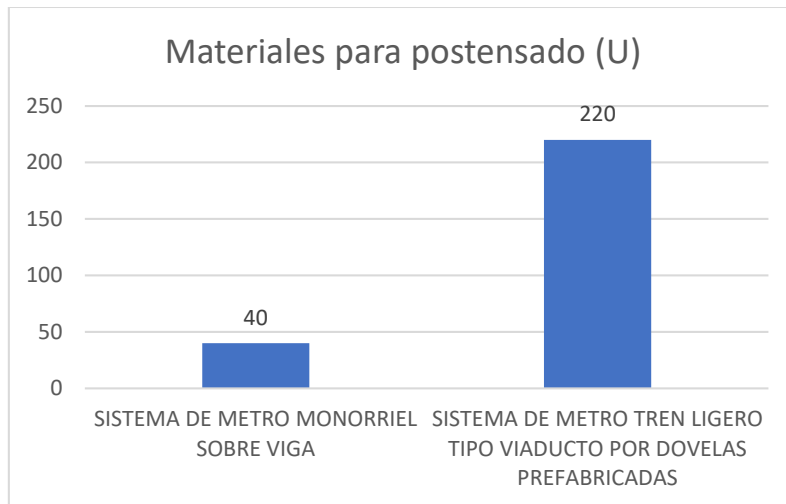


Figura 79 Gráfica de los resultados de la evaluación 1.3 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboracion propia.

1. El tiempo de construcción de la superestructura se reduce un 65%.
2. El uso de materiales para la construcción de la superestructura se reduce en un 33%.
3. El uso de materiales para postensado se reduce en un 82%.

4.6.2 En el ámbito económico:

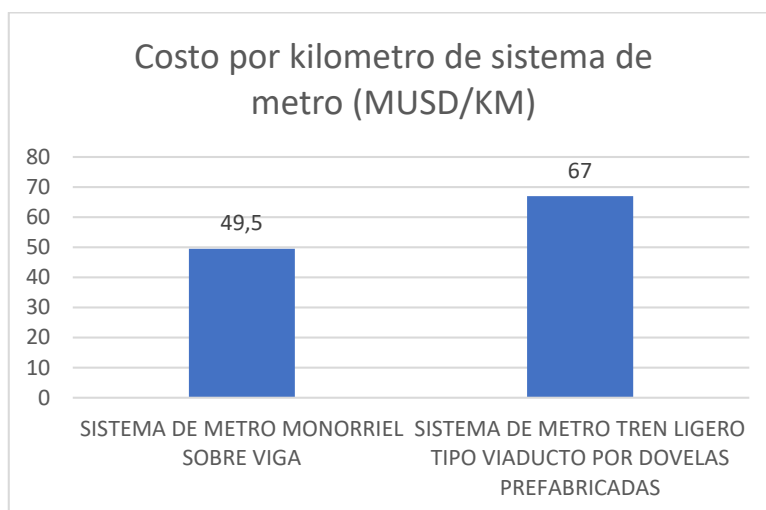


Figura 80 Gráfica de los resultados de la evaluación 2.1 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboracion propia.

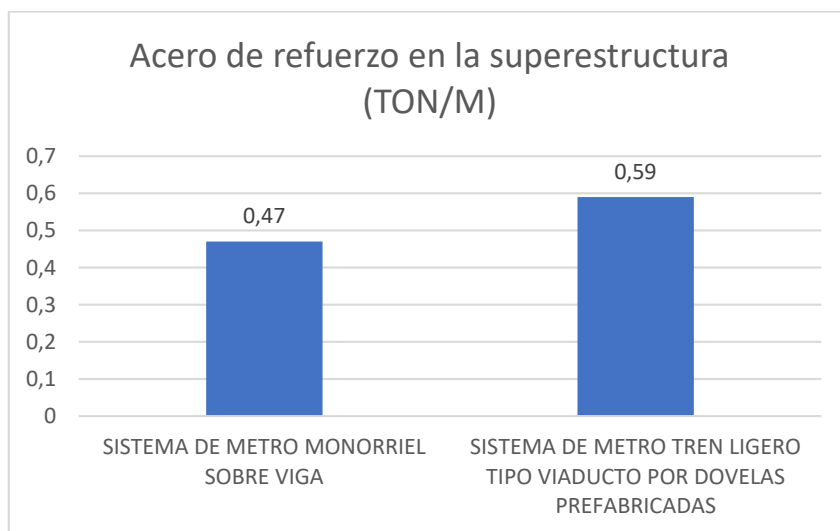


Figura 81 Gráfica de los resultados de la evaluación 2.2 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboracion propia.

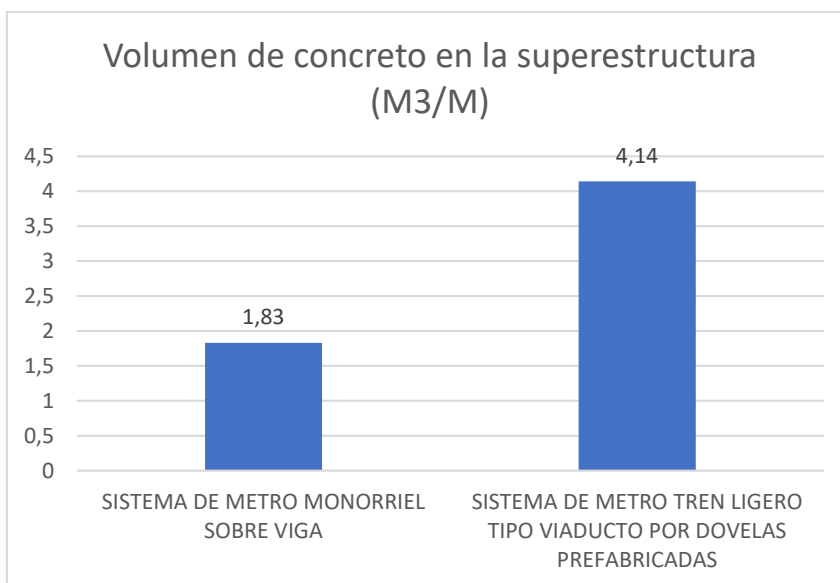


Figura 82 Gráfica de los resultados de la evaluación 2.3 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboracion propia.

1. El costo por kilómetro del sistema de metro se reduce en un 25%.
2. El acero de refuerzo unitario de la superestructura se reduce en un 20%.
3. El volumen de concreto unitario de la superestructura se reduce un 56%.

4.6.3 En el ámbito ambiental:

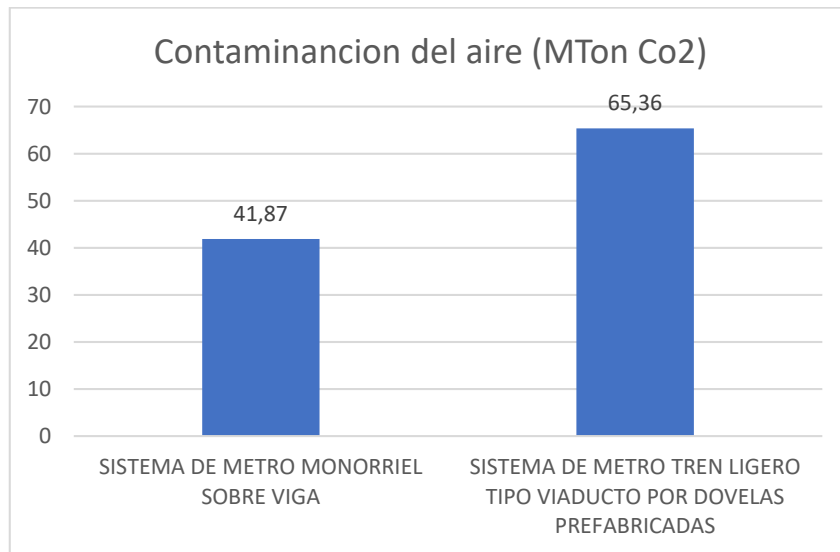


Figura 83 Gráfica de los resultados de la evaluación 3.1 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboracion propia.

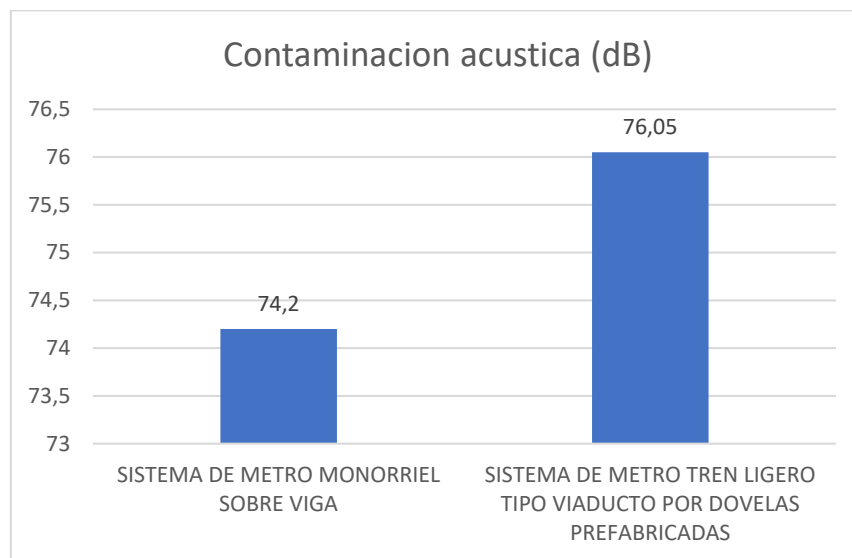


Figura 84 Gráfica de los resultados de la evaluación 3.2 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboracion propia.

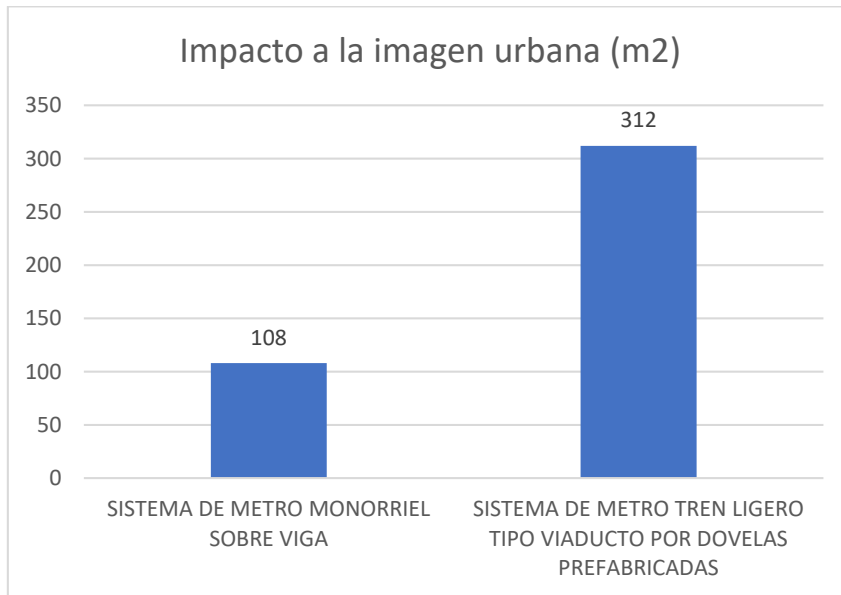


Figura 85 Gráfica de los resultados de la evaluación 3.3 a los sistemas de metro.

Fuente: Elaboración propia.

1. Las emisiones de CO₂ por la construcción de la superestructura del sistema de metro se reduce un 36%.
2. El sistema de metro cumple con la normativa mexicana para la contaminación acústica.
3. Se reduce el impacto a la imagen urbana un 65%.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto al obtener mayor puntaje en la evaluación es el óptimo a aplicar para la construcción de las nuevas líneas del metro de Monterrey.

La construcción de la superestructura del sistema de metro monorriel sobre viga produce 23.49 millones de toneladas de CO₂ menos que del sistema convencional de metros que se ha venido utilizando en la ciudad de Monterrey.

Los costos unitarios por kilómetro de vía del sistema de metro monorriel sobre viga oscilan entre los 49.5 millones de dólares, un 26% menos que el sistema de metro convencional ya implementado en la ciudad de monterrey.

El sistema de metro monorriel sobre viga al ocupar un 65% menos área de intrusión visual en la superestructura ayudará a evitar que baje la plusvalía en los predios por donde están proyectado trascurrir el metro.

El sistema de metro monorriel sobre viga al ocupar un 55% menos cantidad de concreto en la superestructura, se reduce la explotación de canteras para la elaboración de concreto, las cuales, son una de las principales productoras de las partículas PM₁₀ y PM_{2.5}.

El sistema de metro monorriel sobre viga prefabricada de concreto al reducir el tiempo de construcción de la superestructura en un 65%, reduce la afectación del tráfico en las zonas donde se lleva a cabo la construcción del metro.

5.2 Recomendaciones

Debido a que el sistema de metro monorriel sobre viga no cumple con la norma de la OMS para emisión de ruido se recomienda la implementación de disipadores de ruido en las estaciones del metro.

Debido a que en la ciudad de Monterrey es una zona de baja actividad sísmica, se recomienda la reevaluación estructural del sistema de metro en caso se desee implementarlo en países cercanos al cinturón de fuego del pacifico.

Debido a que la ciudad de Monterrey cuenta con características similares a la ciudad de Guayaquil, en cuanto a densidad de tráfico y disponibilidad de espacio para circulación vehicular. Se recomienda implementar un sistema de metro monorriel para el transporte público en la ciudad de Guayaquil.

Debido a que la ciudad de Monterrey cuenta con características similares a la ciudad de Samborondón – La puntilla, en cuanto a densidad de tráfico y disponibilidad de espacio para circulación vehicular. Se recomienda implementar un sistema de metro monorriel para el transporte público en dicho sector de la ciudad con el fin de aliviar el tráfico vehicular.

BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acón García, C. (Marzo de 2018). *ESTUDIO INFORMATIVO RED ARTERIAL FERROVIARIA DE ELCHE: VARIANTE DE CONEXIÓN DE LA NUEVA ESTACIÓN DE ALTA VELOCIDAD CON EL CENTRO URBANO. FASE II*. Obtenido de ESTUDIO INFORMATIVO RED ARTERIAL FERROVIARIA DE ELCHE: VARIANTE DE CONEXIÓN DE LA NUEVA ESTACIÓN DE ALTA VELOCIDAD CON EL CENTRO URBANO. FASE II : https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/a-08_plataforma-superestruc.pdf
- Alcaldes de Mexico. (22 de Marzo de 2022). *www.alcaldesdemexico.com*. Obtenido de Nuevo León reduce presión del agua en área metropolitana por sequía: <https://www.alcaldesdemexico.com/notas-principales/nuevo-leon-reduce-presion-del-agua-en-area-metropolitana-por-sequia/>
- Badio, G. (23 de Abril de 2018). *Proceso Constructivo: Puente con dovelas prefabricadas*. Obtenido de Proceso Constructivo: Puente con dovelas prefabricadas: https://www.youtube.com/watch?v=EMRPRKoJajI&ab_channel=GuadalupeBadio
- BERD ONE BRIDGE ONE SOLUTION. (2023). *LANZADORA DE DOVELAS PREFABRICADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TABLEROS DE PUENTES Y VIADUCTOS DE GRANDES VANOS (ENTRE LOS 70 Y LOS 120 METROS) VANO A VANO*. Obtenido de LANZADORA DE DOVELAS PREFABRICADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TABLEROS DE PUENTES Y VIADUCTOS DE GRANDES VANOS (ENTRE LOS 70 Y LOS 120 METROS) VANO A VANO.: <https://www.berd.eu/es/productos/lauching-gantries/>
- Bessini, J. (Julio de 2014). *RESEARCHGATE.net*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-E12-Geometria-de-la-seccion-transversal-de-una-viga-en-cajon-mixta_fig98_317846153
- Bin Alias, A. A. (Junio de 2015). *ANALYSIS ON NOISE DISTRIBUTION AT DIFFERENT MONORAIL STATION IN KUALA LUMPUR*. Obtenido de <https://docplayer.info/130092692-Analysis-on-noise-distribution-at-different-monorail-station-in-kuala-lumpur-ahmad-arif-bin-alias-a-dissertation-report-submitted-in-partial.html>

- Blanco Jiménez, S., & Altúzar Villatoro, F. (Junio de 2015). *Evaluación de Partículas Suspendidas PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey* . Obtenido de http://aire.nl.gob.mx/docs/reportes/Reporte_WG3_PM2.5_Monterrey.pdf
- Chiri Reyes, L. A., Mendoza Carreño, P., & Poma Ancasí, E. (22 de Marzo de 2019). *Aplicación de la metodología Top Down en la construcción de estaciones de metro*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/625560>
- COMINKA MOTORS. (Septiembre de 2020). *www.cominkamotors.com*. Obtenido de MIXER - MEXCLADORA DE CONCRETO : <https://www.cominkamotors.com/productos/camiones-especiales/sin-subcategoria/mixer-mexcladora-de-concreto-howo-a7-6x4>
- COMUNIDAD DE MADRID CONSEJERIA DE TRANSPORTES E INFRAESTRUCTURAS. (2007). *Prolongación de la Línea 5 desde Canillejas a Alameda de Osuna*. Obtenido de Prolongación de la Línea 5 desde Canillejas a Alameda de Osuna: <https://www.comunidad.madrid/servicios/transporte/prolongacion-linea-5-canillejas-alameda-osuna>
- Conchita Serrano, L., Martínez Cutillas, A., & González-Velrio Navarro, J. A. (21 de Diciembre de 2015). *El proceso constructivo del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz*. Obtenido de El proceso constructivo del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz: <https://www.elsevier.es/es-revista-hormigon-acero-394-avance-resumen-el-proceso-constructivo-del-tramo-S0439568916000061>
- CONSTRUYENDOSEGURO. (Noviembre de 2020). *www.construyendoseguro.com*. Obtenido de Conoce cómo usar la vibradora correctamente: <https://www.construyendoseguro.com/conoce-como-usar-la-vibradora-correctamente/>
- CONSTRUYESINGENIERIA. (Enero de 2023). *Cálculo de cantidades de acero de refuerzo*. Obtenido de <https://www.construyesingenieria.com/2017/07/calculo-de-cantidades-de-acero-de.html>
- Contreras Lee, R., Saavedra Días, Z., Hurtado Gómez, J., Larios Muñoz, E. P., Pineda Pastrana, O., Morales Jacobo, L. A., . . . Pérez Alzaga, A. L. (Julio de 2009). *Evaluación del Ruido Generado en la Red del Sistema de Transporte Colectivo*

- Metro*. Obtenido de <http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EsPA-02-2009.pdf>
- Deingenierias.com. (Agosto de 2022). *De Ingenierías*. Obtenido de Cables de Acero: <https://deingenierias.com/el-acero/cables-de-acero/>
- DIARIO EL NORTE. (10 de Febrero de 2013). *Impactará Metro a plusvalías*. Obtenido de <https://www.elnorte.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=107523&md5=ee26e5f7304f441cee92b87e4a7be21b&ta=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe>
- Dlupal Latinoamerica. (2016). *Dovelas para puentes*. Obtenido de <https://www.dlupal.com.ar/producto/dovela-para-puentes/>
- EDIFICA. (3 de Marzo de 2011). <http://edificaconstruccion.blogspot.com/>. Obtenido de <http://edificaconstruccion.blogspot.com/2011/03/el-sistema-constructivo-top-down.html>
- EL CEO. (22 de Junio de 2023). *Estas son las 10 ciudades con peor tráfico vehicular en México*. Obtenido de <https://elceo.com/tu-cartera/estas-son-las-10-ciudades-con-peor-trafico-vehicular-en-mexico/#:~:text=Monterrey%20experiment%C3%B3%20un%20retroceso%20en,de%2030.5%20kil%C3%B3metros%20por%20hora.>
- EL HERALDO MEXICO. (25 de Enero de 2021). <https://heraldodemexico.com.mx>. Obtenido de Como municipio, Monterrey, es el décimo más poblado del país: INEGI: <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2021/1/25/como-municipio-monterrey-es-el-decimo-mas-poblado-del-pais-inegi-249023.html>
- EL OCCIDENTAL. (6 de Mayo de 2022). *EL OCCIDENTAL*. Obtenido de Línea 4 del metro de guadalajara: <https://www.eloccidental.com.mx/local/noticias-l%C3%ADnea-4-movilidad-constructores-camara-mexicana-de-la-industria-de-la-construccion-carlos-del-rio-madrigoal-5509361.html>
- El-Diraby, T., Abdulhai, B., & Pramod, K. (2005). The application of knowledge management to support the sustainable analysis of urban transportation infrastructure. *NRC Canada*, 58 - 60.
- Fernández Valdivieso, R. (2016). *Sostenibilidad en el sector de la construcción. Sostenibilidad en estructuras y puentes ferroviarios*. Madrid, España.

Gerardino Perdomo, M. (Junio de 2011). *Estudio Comparativo de Puentes Construidos por Voladizos Sucesivos*. Obtenido de Estudio Comparativo de Puentes Construidos por Voladizos Sucesivos: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12701/Estudio%20Comparativo%20de%20Puentes%20Construidos%20por%20Voladizos%20Sucesivos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gestión ambiental Mexicana. (12 de Enero de 1995). *Norma Oficial Mexicana NOM-079-ECOL-1994, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de los vehículos automotores nuevos en planta y su método de medición*. Obtenido de <http://www.profepa.gob.mx/>: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/658/1/NOM079SEMARNAT1994.pdf>

Gobierno de México. (2023). <https://www.gob.mx/>. Obtenido de Transportes sustentables de uso colectivo: trenes (2a. parte): <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/transportes-sustentables-de-uso-colectivo-trenes-2a-parte?idiom=es>

González Manrique, E. (22 de Febrero de 2023). *Contaminación en Nuevo León: versiones encontradas*. Obtenido de <https://verificado.com.mx/>: [https://verificado.com.mx/contaminacion-nuevo-leon-versiones-encontradas/#:~:text=La%20ciudad%20de%20Monterrey%20es,de%20la%20Salud%20\(OMS\).](https://verificado.com.mx/contaminacion-nuevo-leon-versiones-encontradas/#:~:text=La%20ciudad%20de%20Monterrey%20es,de%20la%20Salud%20(OMS).)

HERCAB. (2022). *Empujadora de cables para tensar*. Obtenido de <https://hercab.com/producto/23/paul-empujadoras-de-cable-de-0-5-y-0-6-para-pretensado-con-carro-ajustable-y-control-remoto>

Heredia Navarro, M. (Junio de 2015). *PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNEL POR EL SISTEMA "CUT AND COVER" PARA EL ACCESO FERROVIARIO DEL CERCANÍAS A MARBELLA*. Obtenido de https://oa.upm.es/37529/1/PFC_Maria_Heredia_Navarro.pdf

<https://es.made-in-china.com/>. (2023). *Hormigón pretensado de HDPE de plástico de conducto para cable de anclaje de pretensado*. Obtenido de https://es.made-in-china.com/co_china-prestressing/product_Prestressed-Concrete-Plastic-HDPE-Duct-for-Prestressed-Anchor-Cable_ruhguoneg.html

<https://mtt-maxim.com/>. (2023). *Vaina o ducto postensado*. Obtenido de <https://mtt-maxim.com/vaina-ducto-postensado/>

Huerta, L. A. (21 de Enero de 2023). *Revista Traspotes y Turismo*. Obtenido de Monterrey, entre las 10 ciudades más congestionadas del mundo en el 2022: <https://www.tyt.com.mx/nota/monterrey-entre-las-10-ciudades-mas-congestionadas-del-mundo-en-2022>

I&A INGENIERIA Y ALQUILERES. (2021). *www.ingenieriayalquiler.com*. Obtenido de Alquiler de bomba de concreto estacionaria: <https://ingenieriayalquiler.com/alquiler-de-bombas-de-concreto/alquiler-de-bomba-de-concreto-estacionaria-cifa-506-309/>

INEGI. (2023). *Consulta de indicadores sociodemográficos y económicos por área geográfica*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/>

Juvenal del Castillo Moisés. (8 de Septiembre de 2021). *Proceso constructivo puente en voladizos sucesivos, simulación*. Obtenido de Proceso constructivo puente en voladizos sucesivos, simulación.: https://www.youtube.com/watch?v=AT1JD4a69Wc&t=1s&ab_channel=JuvenalDelCastilloMois%C3%A9s

LINEASDELMETRO.COM.MX. (2019). *LINEASDELMETRO*. Obtenido de <https://lineasdelmetro.com.mx/monterrey/padre-mier/>

METROREY. (Enero de 2023). *METROREY LINEA 1*. Obtenido de <https://metromonterrey.com/linea-1/>

MEXPRESA. (Agosto de 2020). *Presfuerzo Postensado*. Obtenido de <https://www.mexpresa.com/productos/presfuerzo.php>

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador. (7 de Mayo de 2023). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES*. Obtenido de https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf

Muhammad Das, A., Yukawa, S., Amiruddin, I., Riza Atiq, R., & Mohd Azizul, L. (23 de Diciembre de 2013). *COMPARATIVE ANALYSIS OF MONORAIL SYSTEM BETWEEN KUALA LUMPUR MALAYSIA AND KITAKYUSHU JAPAN*. Obtenido de

https://www.academia.edu/5989641/Comparative_Analysis_of_Monorail_System_Between_Kuala_Lumpur_Malaysia_and_Kitakyushu_Japan

Oró Quixal, R. (2005). *Estética en la ingeniería civil. Elementos de composición y situación actual*. Obtenido de *Estética en la ingeniería civil. Elementos de composición y situación actual*.: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3311/55859-1.pdf>

PERI España. (2023). *VBC VARIOKIT Carro para avance en voladizo*. Obtenido de *VBC VARIOKIT Carro para avance en voladizo*: <https://www.peri.es/productos/encofrados/soluciones-para-obra-civil/sistemas-para-obra-civil/vbc-balanced-cantilever-carriage.html>

Pozo Rojas, J. C., & Ochoa Cornejo, F. (2016). <https://docplayer.es/>. Obtenido de ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES DE METRO MEDIANTE MÁQUINAS TUNELADORAS: <https://docplayer.es/54987517-Estudio-de-prefactibilidad-para-la-construccion-de-tuneles-de-metro-mediante-maquinas-tuneladoras.html>

PREFAMOVIL. (2022). *PREFAMOVIL OBRAS EMBLEMATICAS*. Obtenido de [prefamovil.com.mx](https://www.prefamovil.com.mx/obras-principales.html): <https://www.prefamovil.com.mx/obras-principales.html>

Ramírez, J. (17 de Junio de 2014). <http://metrorrey.blogspot.com/>. Obtenido de *Metrorrey y sistemas similares de transporte*: <http://metrorrey.blogspot.com/2014/06/analisis-comparativo-de-secciones.html>

Reyes, D. (4 de Agosto de 2022). *Diario EL Norte*. Obtenido de *Perfilan el sistema monorriel para las líneas 4, 5 y 6*.: https://www.elnorte.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?__rval=1&urlredirect=https://www.elnorte.com/perfilan-el-sistema-monorriel-para-líneas-4-5-y-6-del-metro/ar2447331?referer=--7d616165662f3a3a6262623b727a7a7279703b767a783a--

ROBERT STEPHENSON AND COMPANY. (2023). *BULL JOHN*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/John_Bull_%28locomotora%29#/media/Archivo:John_Bull.jpg

Sánchez Rosales, P. V., & Toledo Días, A. J. (2020). *Estudio de factibilidad del proyecto social ""Tren Urbano Arica""*. Obtenido de <https://repositorio.uta.cl/jspui/handle/123456789/752>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (11 de Junio de 2017). *La excesiva sonoridad daña a 13 millones de personas en países de la OCDE y a 120 millones en el mundo*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/ssshhh-es-dia-mundial-de-la-descontaminacion-acustica?idiom=es#:~:text=La%20OMS%20considera%20que%20los,es%20peli-groso%20y%20posiblemente%20genere>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (21 de Enero de 2021). *Partículas suspendidas PM10 y PM2.5 dañan salud y medio ambiente*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/particulas-suspendidas-pm10-y-pm2-5-danan-salud-y-medio-ambiente>

Tapia Ramírez, Rubi. (10 de Junio de 2020). *Monterrey: la capital industrial de México*. Obtenido de *Monterrey: la capital industrial de México*: <https://inmobiliare.com/monterrey-la-capital-industrial-de-mexico/>

TECNOLOGIA LOGISTICA Y MONTAJE SA. (2019). *Manual de Procedimientos y Seguridad en Izaje de elementos de dimensiones extraordinarias*. Monterrey: TLM.

The Editors of Encyclopaedia Britannica. (16 de Mayo de 2023). *Metropolitan Railway*. Obtenido de <https://www.britannica.com/technology/subway>

TraduNET. (2023). *Terminología para la traducción técnica en transporte ferroviario*. Obtenido de *Terminología para la traducción técnica en transporte ferroviario*: <https://tradunet.com/blog/terminologia-transporte-ferroviario/>

Valor Compartido. (15 de Diciembre de 2022). *Monterrey, Toluca y Salamanca: las ciudades más contaminadas de México*. Obtenido de <https://valor-compartido.com>: <https://valor-compartido.com/monterrey-toluca-y-salamanca-las-ciudades-mas-contaminadas-de-mexico/#:~:text=Monterrey%20es%20la%20ciudad%20m%C3%A1s,de%204.1%20millones%20de%20habitantes>.

Vargas Luna, M. J. (Septiembre de 2015). *Diseño de un tren elevado suspendido con sistema de recuperación y transformación de energía que propicie su desplazamiento, para implementarlo en la zona oriente del Estado de México*. Obtenido de *Diseño de un tren elevado suspendido con sistema de recuperación*

y transformación de energía que propicie su desplazamiento, para implementarlo en la zona oriente del Estado de México: <http://hdl.handle.net/11191/6638>

PLANOS Y ANEXOS

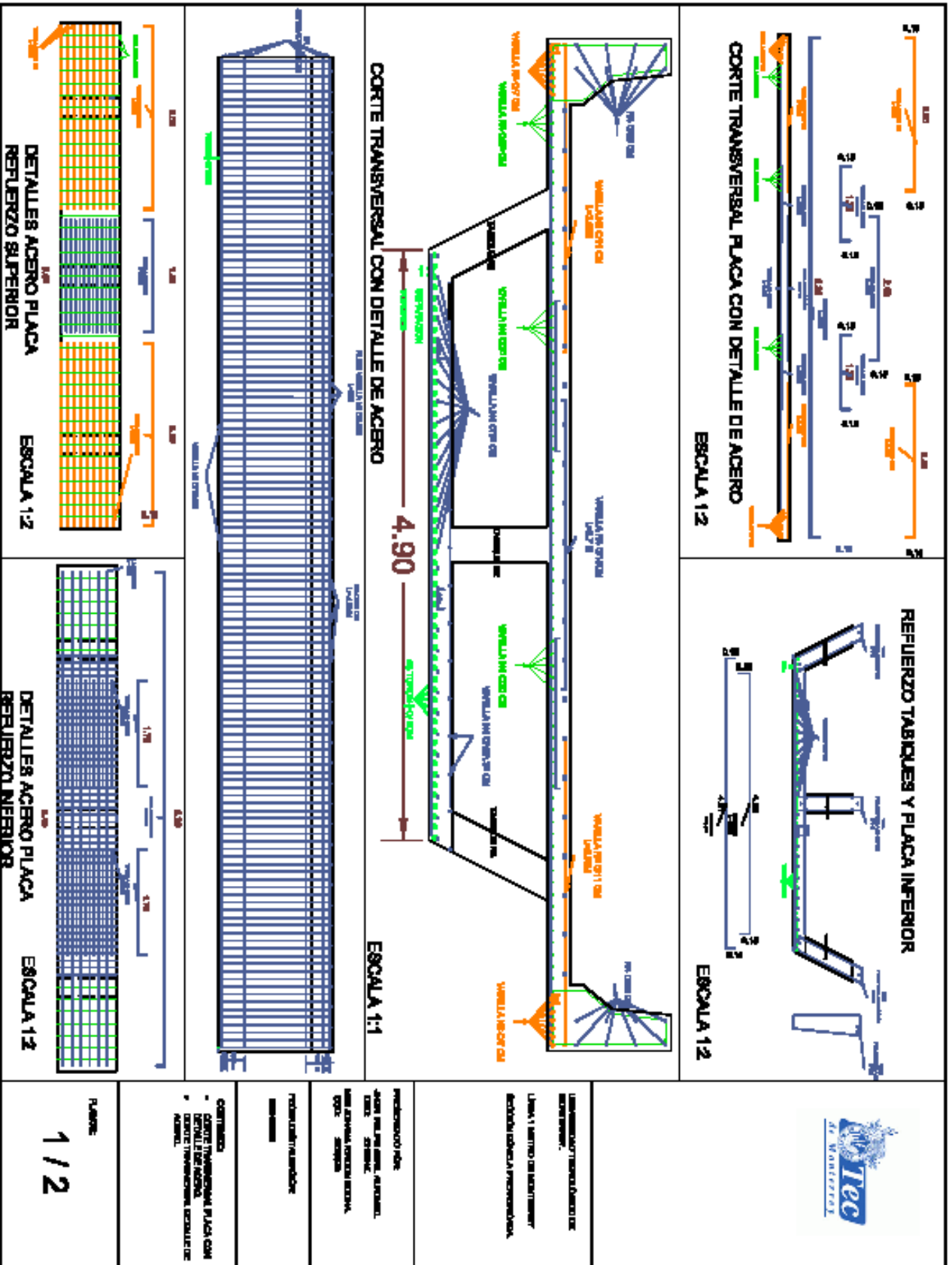
PROYECTOS DE SISTEMAS DE METRO REALIZADOS POR LA EMPRES MOTAENGL-MEXICO

PROYECTOS DE SISTEMAS DE METRO MOTAENGL																
SISTEMA	LINEA	FECHA	PAIS	COSTO TOTAL MDP	LONGITUD KM	COSTO/KM MDP	COSTO/KM MUSD	TIPO VIA	KM TUNEL	KM VIADUCTO	# ESTACIONES	# TRENS	# VAGONES	FABRICANTE	DEMANDA (MILES USUARIOS)	
MONORIEL	4,5,6	2022	MEX / MTY	36.531	36,0	1.015	49,5	VIADUCTO	0,0	36,0						
TREN LIGERO	4	2022	MEX / GDL	11.281	21,0	537	26	A NIVEL / DERECHO VIA			8	13			106	
TREN LIGERO	3	2020	MEX / GDL	31.500	21,5	1.465	71	VIADUCTO	5,3	16,2	18	18		ALSTOM	233	
TREN LIGERO	3	2021	MEX / MTY	9.655	7,5	1.287	63	VIADUCTO/subterráneo	0,8	6,7	8		26 / 24	CRRC / ALEMAN	116	
METRO FERREO	12	2012	MEX / CDMX	26.200	20,0	1.310	64	Subterráneo	8,0	12,0	20	30		CAF		
TREN SUBURBANO	1	2008	MEX / CDMX	10.747	25,5	421	21	A NIVEL / DERECHO VIA	0,0	0,0	7	20		CAF	350	
TREN LIGERO	1	2021	MEX / CDMX	744	13,5	55	3	REHABILITACION DE VIA						COMSA		
TROLEBUS ELEVADO	1	2022	MEX / CDMX	3.220	8,0	403	20	VIADUCTO			11				1800	
CABLEBUS	1	2021	MEX / CDMX	2.925	9,2	318	16	ELEVADO			6	377		DOPPERLMAYR	50	
MONORIEL		1995	USA / LAS VEGAS			513	25	VIADUCTO								
MONORIEL		2003	MALASIA / KUALA LUMPUR			738	36	VIADUCTO								
MONORIEL		2004	USA / LAS VEGAS			1.804	88	VIADUCTO								
MONORIEL		2006	DUBAI/ Palm Jumeirah			1.505	73	VIADUCTO								
MONORIEL		2008	METRAIL			410	20	VIADUCTO								
MONORIEL		2008	MUMBAI			559	27	VIADUCTO								

PTO MONTERREY	COSTO/KM MUSD
26.500	36
DIFERENCIA	14
CANTIDAD DE KM	26

COSTO/KM MUSD	MDP / KM
COSTO PROM	1014,8
66,0	MUSD / KM
	49,5
	75% PROM VIADUCTO

PLANO 1



INSTRUMENTACIÓN DE OBRA

LIBRO 1: LIBRO DE REGISTRO DE OBRA

PROYECTO DE OBRA

PROYECTO DE OBRA

PROYECTO DE OBRA

CONTENIDO
 - CORTE TRANSVERSAL PLACA CON
 DETALLE DE ACERO
 - CORTE TRANSVERSAL PLACA CON
 DETALLE DE ACERO

