



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN**

**SANEAMIENTO DE LA PRESA  
GUADALUPE TÚNEL 4**

**T R A B A J O  
P R O F E S I O N A L**

Que para obtener el grado de:  
**INGENIERO CIVIL**

Presenta:  
**ALEXIS EMMANUEL RODRÍGUEZ CAMACHO**

Asesor:  
**ING. RICARDO GARCÍA VALDIVIA**

Estado de México, diciembre 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# CONTENIDO

<b>Introducción.</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Objetivo</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Generalidades la Presa Guadalupe.</b> .....	<b>10</b>
2.1 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LA PRESA GUADALUPE. ....	11
<b>3. Generalidades del proyecto: sanemamiento del santuario Presa Guadalupe.</b> .....	<b>13</b>
<b>4. Las lumbreras como obra contemporánea de la ingeniería civil.</b> .....	<b>18</b>
4.1 EL MÉTODO PIPE JACKING. ....	20
<b>5. Infraestructura elemental para la construcción de la lumbrera del túnel 4.</b> .....	<b>22</b>
5.1 EQUIPOS Y MAQUINARIA NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN LA LUMBRERA DE EMPUJE DE TÚNEL 4. ....	28
5.2 MATERIALES NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA LUMBRERA DE EMPUJE DE TÚNEL 4. ....	30
5.3 PERSONAL NECESARIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA LUMBRERA DE EMPUJE DE TUNEL 4. ....	32
5.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA LUMBRERA DE EMPUJE TÚNEL 4. ....	34
5.4.1 Trazo y nivelación. ....	34
5.4.2 Excavación de la lumbrera de empuje. ....	36
5.4.3 Losa de fondo de la lumbrera de empuje. ....	42
5.4.4 Muro de reacción. ....	48
<b>6. Infraestructura elemental para el proceso de hincado del túnel 4 por el metodo Pipe Jacking.</b> .....	<b>53</b>
6.1 EQUIPOS Y MAQUINARIA NECESARIOS PARA EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE HINCADO. ....	54
6.2 MATERIALES GENERALES UTILIZADOS EN LA OPERACIÓN. ....	57
6.3 PERSONAL NECESARIO PARA EL HINCADO DE TUBERÍA DEL TUNEL 4 POR EL METODO DE PIPE JACKING. ....	60
6.4 PROCESO CONTRUCTIVO DEL TÚNEL 4. ....	64
6.4.1 Suministro y habilitado de tubos de concreto. ....	64
6.4.2 Alineación y colocación del rayo láser. ....	66
6.4.3 Empotramiento del escudo excavador. ....	67
6.4.3.1 Los gatos telescópicos de empuje. ....	70
6.4.3.2 Diario de control de aplicación de recursos de obra y obtención de resultados. ....	71
6.4.4 Instalación de las líneas fundamentales del túnel. ....	73
6.4.5 Retiro y acarreo de material excavado. ....	75
6.4.6 Bajada de un nuevo tubo a la lumbrera de empuje. ....	76
6.4.7 Colocación de Estaciones Intermedias de Empuje. ....	80
6.4.8 Inyección de lodo bentonítico. ....	83
6.4.9 Salida del escudo excavador. ....	87
6.4.10 Desmantelamiento, limpieza y retiro de equipos en el túnel 4 y su lumbrera de empuje. ....	90
6.4.10.1 Desmantelamiento y limpieza del túnel 4. ....	90
6.4.10.2 Desmantelamiento y limpieza de la lumbrera de empuje. ....	92
6.5 INSPECCIONES FUNDAMENTALES EN EL PROYECTO DEL TUNEL 4. ....	95
6.5.1 Revisión topográfica. ....	95
6.5.2 Revisión preventiva. ....	99
6.6 CONTRATIEMPOS Y COMPLEJIDADES DURANTE LA EJECUCIÓN DEL TÚNEL 4. ....	101
6.6.1 Lluvia. ....	101

6.6.2 Rocas en el frente de excavación.....	101
6.6.1 Fallas mecánicas y trabajos necesarios.....	106
6.6.1.1 Sobre calentamiento del escudo excavador.....	106
6.6.1.2 Cambio periódico del aceite hidráulico del escudo excavador.....	106
6.6.1.3 Cambio de llanta de la grúa Groove.....	107
<b>7. Conclusión.....</b>	<b>108</b>
FUENTES CONSULTADAS.....	110

## INTRODUCCION.

Debido a la alta producción de aguas negras que hoy en día son producidas en viviendas, edificios e industrias del Estado de México y de la República Mexicana que en su mayoría son dispuestas en lagos y ríos importantes, ha surgido la necesidad de conducir dichas aguas a plantas de tratamiento para que puedan ser reusadas en un futuro para diversas actividades.

En la actualidad la disposición del agua desempeña un papel importante alrededor del mundo, ya que representa una gran fuente hacia los sectores de la industria, irrigación y uso municipal.

Para proporcionar una calidad aceptable del agua a reusarse, se deberán realizar pruebas en laboratorio que aprueben su disposición; dichas pruebas están apegadas a las siguientes Normas:

- I. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-SEMARNAT-1997
- II. NORMA MEXICANA NMX-AA-005,
- III. NORMA MEXICANA NMX-AA-006, NORMA MEXICANA NMX-AA-028
- IV. NORMA MEXICANA NMX-AA-034
- V. NORMA MEXICANA NMX-AA-42

Estas normas son parte fundamental en cualquier proyecto de reúso del agua, por lo cual las muestras del líquido deberán ser monitoreadas constantemente para asegurar que sus condiciones sean siempre las adecuadas, permitiéndonos, de forma resumida, conocer el estado tanto físico como químico del líquido, para así, poder determinar y evaluar si es apta para su futura disposición.

En el proyecto del Colector Presa Guadalupe, se realizarán diversos análisis de muestras, ya que las condiciones del agua residual están en función a la zona de la cual provengan, que en su mayoría serán de uso doméstico, por la gran cantidad de nuevos fraccionamientos y colonias ya existentes (52%), y en menores cantidades las industrias (48%).

La necesidad de desviar dichas aguas residuales hacia una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (P.T.A.R.) surge a raíz de la alta contaminación de la mayoría de los vasos reguladores. En un inicio dichas aguas residuales eran conducidas a través de ductos pead a una profundidad baja, pero conforme la sociedad comenzó a desarrollarse rápidamente, la demanda de agua aumentó y por consecuencia el volumen de agua residual por vivienda es mayor, lo que obliga a los campos de la ingeniería a buscar un método alternativo para desviar el líquido en una tubería de mayor diámetro, pero sin afectar las zonas aledañas a la trayectoria del proyecto, ya que al estar trabajando con un tubo de grandes dimensiones, significaría tener que preparar un trayecto a cielo abierto de grandes dimensiones, que incluso sería peligroso para los trabajadores y afectaría toda la superficie del colector.

Por dichas necesidades ha surgido el novedoso método de microtúnel o también llamado Pipe Jacking en algunos países, el cual permite la instalación de tubería de concreto de una forma eficiente en tramos unidireccionales o bien, rectos. Este procedimiento ha tenido presencia en grandes obras subterráneas de México y a nivel internacional.

Este mecanismo ha ayudado a reducir la deforestación de zonas de bosque, cuando se tiene que atravesar una zona natural, ya en su mayoría el proceso constructivo de este sistema es en sobre el subsuelo a profundidades de al menos 6 metros, mediante la utilización de tubería de concreto en sus diferentes diámetros internos, tales como: 1.52 m (60 in) , 1.83 m (72 in), 2.44 m (96 in), 3.05 m (120 in) y hasta 3.50 metros (138 in), que dependiendo de las características específicas de cada proyecto se determinará el diámetro adecuado. El sistema de tubería será instalado mediante un sistema de hincado en una lumbrera de empuje, conformado de gatos telescópicos que estarán ejerciendo la presión necesaria al escudo excavador para que pueda abrir el espacio suficiente en el estrato de suelo y recibir la cantidad de tubos que requiera el túnel.

Debido a las altas presiones del suelo, y del propio método de microtúnel, que se ejercen directo sobre el sistema de drenaje, es necesario emplear tubería de

concreto de alta resistencia ( $350\text{kg/cm}^2$ ) con el fin de evitar la fractura de los elementos y así evitar contratiempos en la obra.

Por otra parte, si se trata de un sistema de drenaje a menor profundidad y con un diámetro de servicio menor, es necesario trabajar con zanjas a cielo abierto y no con el método de hincado Pipe Jacking, además de emplear tubería de pead y no de concreto, debido a que el material no estará expuesto a las altas presiones de este método ni del suelo que lo confinará.

Existen casos donde se requiere que los túneles hincados por el método de Pipe Jacking tengan una conexión con algún tramo donde no será posible continuar con este mismo método, por posibles curvas que tenga que superar el proyecto, aquí también será posible construir un sistema de tubería de concreto subterráneo, pero será por un procedimiento a cielo abierto (figura a.1). El método de cielo abierto consiste en extraer el material de la línea del proyecto por medio de excavación manual y maquinaria, hasta permitir la instalación de la tubería de forma vertical (figura b.2), como es el caso del colector sur de este embalse, donde han tenido que instalar ciertos tramos de tubería por el ultimo método mencionado, con el conocimiento de que representa un mayor costo y tiempo para su ejecución.



**Figura a.1.** Los túneles 4 y 5 del Colector Sur de la presa Guadalupe son unidireccionales, mientras la zona señalada con la línea entre el inicio de ambos túneles es un tramo construido a cielo abierto. Fuente: Google Earth (2017).



**Figura a.2.** Instalación de tubería a cielo abierto en tramo no recto. Fuente: elaboración propia.

El microtúnel también tiene que superar ambientes y lugares de trabajo adversos, desde zonas con alta presencia de rocas, presencia del Nivel de Agua Freático (N.A.F.) en la zona donde tiene que ser ubicado el túnel, instalaciones subterráneas que puedan concurrir en el paso del túnel, entre otros.

En el caso del presente proyecto, se ha trabajado a pie de la presa Guadalupe, en una zona no urbanizada totalmente, lo cual resultó benéfico para la obra ya que permite el paso de maquinaria y equipos sin dificultad, además de no afectar instalaciones subterráneas permitiendo trabajar en la construcción de la lumbrera 4 sin causar problemas con familias y hogares localizados en zonas aledañas al colector sur del proyecto.

En este documento se describirá: el funcionamiento del sistema del microtúnel o de Pipe Jacking, el proceso constructivo de la lumbrera del túnel 4 como obra auxiliar para la construcción del colector sur de la presa Guadalupe en una zona no urbanizada, el proceso de hincado, materiales necesarios, equipos y personal necesario para su ejecución y su llegada a la zona de trabajo, contratiempos particulares de la obra, así como mi intervención en la solución de los mismos.

## 1. OBJETIVO

Mediante este proyecto de Ingeniería se pretende erradicar el problema de contaminación del agua de la presa Guadalupe, a través de un sistema de infraestructura sustentable que ayude a tratar las aguas residuales provenientes de los municipios de Tlazala de Fabela, Santa Ana Jilotzingo, Nicolás Romero, Atizapán de Zaragoza (Ciudad Adolfo López Mateos) y Cuautitlán Izcalli, cuyas aguas servidas a diario son descargadas en esta reserva natural.

Mediante este proyecto se contribuirá a la mejora de la calidad del agua y de los seres vivos que ahí habitan, ya que se espera que la presa recupere su aspecto natural con el paso de al menos 10 años, al ya no verter ninguno de los gastos de aguas residuales en este vaso regulador.

A través de esta infraestructura se lograrán desviar dichas aguas residuales en dos obras principales: un colector norte y otro sur, trabajando en conjunto con subcolectores y puentes canal, distribuidos a lo largo del perímetro del embalse y conducidos finalmente a un túnel emisor que tendrá como destino una Planta Tratadora de Aguas Residuales (P.T.A.R.) localizada en la colonia La Perla en el municipio de Cuautitlán Izcalli, la cual tendrá la capacidad de tratar un caudal máximo de 750 lps.

El uso del agua que será tratada, estará destinado inicialmente para actividades de riego, mientras que el agua que capte la presa Guadalupe únicamente sea por precipitación pluvial, mientras se trabaja en el retiro de sólidos y sedimentos del embalse, para agilizar los trabajos de restauración de este embalse.

Con este proyecto se mantendrá la presa Guadalupe como una reserva ecológica, turística y natural cercana a la ciudad, que es el hogar de especies de aves migratorias y otras endémicas; además de que en esta zona se ubica un campo de golf y una zona residencial exclusiva, siendo la presa Guadalupe un punto de interés cercano.

## **2. GENERALIDADES LA PRESA GUADALUPE.**

El vaso regulador Lago de Guadalupe se encuentra localizado en el sureste del municipio de Cuautitlán Izcalli y al oeste de Nicolás Romero en el Estado de México, a una altitud de 2350 m.s.n.m. en la zona oeste de la cuenca Valle de México en los lomeríos que marcan el límite del Valle de México con la Sierra de Monte Alto. Al ser el principal sistema hidrológico de la zona, en 2004 fue decretada como parque estatal, santuario de agua y forestal Presa Guadalupe.

Este vaso fue construido entre los años 1936 y 1943, para el control de inundaciones y en una buena parte los ríos que descargan en el vaso son utilizados para el riego.

Su capacidad es de 60 millones de metros cúbicos y su espejo de agua es de 348 hectáreas y un perímetro aproximado de 17.5 km, su profundidad máxima es cercana a los 40 m en su parte central y la precipitación pluvial anual en la región es de 700 mm. La región posee un clima sub-húmedo con lluvias durante el verano y parte del otoño.

El embalse está rodeado por áreas urbanas y zonas de vegetación (bosques, zonas de cultivo y un club de golf).

El límite sur de la presa se ubica en la latitud  $19^{\circ} 38'6.01''$  hasta su extremo norte ubicado en  $19^{\circ} 38'19.64''$ , los límites este y oeste son  $19^{\circ} 37' 34.64''$  y  $19^{\circ} 37' 20.75''$ .

## **2.1 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LA PRESA GUADALUPE.**

Día con día este embalse localizado en el Estado de México se encuentra expuesto a diversas formas de contaminación, como la descarga directa de aguas residuales provenientes de los ríos: Cuautitlán, San Pedro, Chiquito, Xinté y Muerto, además de personas que arrojan desechos inorgánicos directo a la presa o bien familias que acuden al recinto a actividades familiares quienes dejan sus desechos en la superficie y son arrastrados por el viento hasta el espejo de agua del embalse; así como la quema de basura y tala de árboles aledaños al sitio, lo que pone en riesgo el bienestar del ecosistema así como de la calidad del agua que allí se almacena.

El Dirección del Medio Ambiente de Cuautitlán Izcalli puso en marcha desde el año 1997 una brigada de limpieza especial conformada por 13 personas quienes se dedican a dar un mantenimiento constante a este santuario y a notificar a los visitantes cuales actividades son permitidas, con la finalidad de erradicar la contaminación que a diario acecha a la presa Guadalupe (figura 2.1.a).

En la actualidad, tanto la Dirección del Medio Ambiente de Cuautitlán Izcalli como los colonos quienes viven cerca de esta presa, se han dado a la tarea de apoyar con actividades de limpieza y reforestación para tratar de reducir los daños debidos a la contaminación de este que es uno de los pocos santuarios con los que cuenta el Estado de México.

Hoy en día, la disposición del agua ha superado la oferta de la Naturaleza debido a que la mancha urbana se está expandiendo a gran velocidad, originando que constantemente sean más las viviendas y edificios los que demanden su uso y consumo, ocasionando incluso, que la infraestructura y los servicios no sean suficientes para abastecer las necesidades que requiere la sociedad.

Haciendo énfasis en el tema del uso y manejo del sistema del cual se compone la presa, tan solo en el año 2017 se lograron retirar cerca de 4,600 m<sup>3</sup> de residuos sólidos de la Presa Guadalupe; dicha situación nos lleva a hacer conciencia para las próximas generaciones, puesto que la tendencia es a crecer con el paso de los años, lo que ocasionará un mayor consumo de agua y generación de desechos.



**Figura 2.1.a.** Se aprecia la variada flora presente en el área de trabajo. Fuente: elaboración propia.

### 3. GENERALIDADES DEL PROYECTO: SANEAMIENTO DEL SANTUARIO PRESA GUADALUPE.

Este proyecto de la Comisión del Agua del Estado de México, está localizado entre los límites del municipio de Cuautitlán Izcalli y Nicolás Romero, el sistema se compone de tres grandes obras que a continuación se mencionan:

- **Colector Norte (figura 3.a):** esta fue la primera obra en construirse del proyecto maestro y fue concluida en el año 2007 por medio del método de instalación a cielo abierto y en la actualidad ya se encuentra en operación. Esta obra cuenta con una extensión total de 8.10 km, rodeando perimetralmente la zona norte de la presa Guadalupe y tiene como objetivo principal, la conducción de un caudal promedio de 500 lps de las aguas residuales provenientes del Río San Pedro, a partir de una derivadora de mismo nombre del río antes mencionado la cual se encuentra ubicada en el municipio de Nicolás Romero. La conducción de las aguas residuales se realiza por medio de tubería pead de 1.07 m (42 in) de diámetro, que conducen este gasto hasta el túnel emisor el cual transportará las aguas servidas tanto del colector norte y otro sur a la P.T.A.R.
- **Colector Sur (figura 3.a):** es la segunda parte del proyecto que hoy en día se encuentra en construcción, es un colector de 15.10 km y tubería de concreto de 1.83 m (72 in) de diámetro, alcanzando profundidades de hasta 34 m en la parte perimetral sur de la presa, conducirá un gasto promedio de aguas residuales de 1720 lps. En su mayoría se puede aplicar el método de hincado Pipe Jacking debido a que el colector contempla tramos unidireccionales y en algunas partes instalación a cielo abierto, por las características topográficas del terreno y del proyecto. En el caso de los tramos donde se empleará el método Pipe Jacking será necesario emplear tubos de concreto, el cual, por conocimientos predeterminados de las presiones de este proceso constructivo de hincado, dichos tubos deberán tener una resistencia a la compresión de 350 kg/cm<sup>2</sup>.

Por continuidad del proyecto y cantidad de gasto que circulará sobre este colector se respetará el diámetro y el material de los tubos (concreto armado) utilizados para este colector, aun tratándose de instalación a cielo abierto, a excepción de los subcolectores donde se empleará tubería pead.

Hasta ahora se registra un avance aproximado del 50% en la construcción de esta obra, el cual está conformado por 3 presas derivadoras, la primera de ellas lleva por nombre San Idelfonso y se encarga de controlar el flujo del río Chiquito y se encuentra localizada en el municipio de Nicolás Romero, posterior a esta derivadora se conduce el caudal del mismo río a través de un subcolector construido con tubería pead de 61 cm de diámetro hasta intersectar al primer túnel de este colector Sur; la segunda derivadora es llamada Xinté, la cual controla el río del mismo nombre, posterior a esta el caudal se ramifica en dos subcolectores (subcolector Xinté 1 y 2) de 61 cm de diámetro cada uno, que rodean parte del espejo de agua de la presa hasta interceptarse al colector principal sur en el túnel 2, finalmente la tercer derivadora lleva por nombre Campestre, localizada en el municipio de Cuautitlán Izcalli y ayuda a controlar el gasto del río Muerto, el diámetro de la línea del subcolector es el mismo que el subcolector 1 y los de la segunda derivadora. En este colector se localiza la construcción del túnel 4, el cual está conformado por 156 tubos de concreto y una longitud de 390 metros.

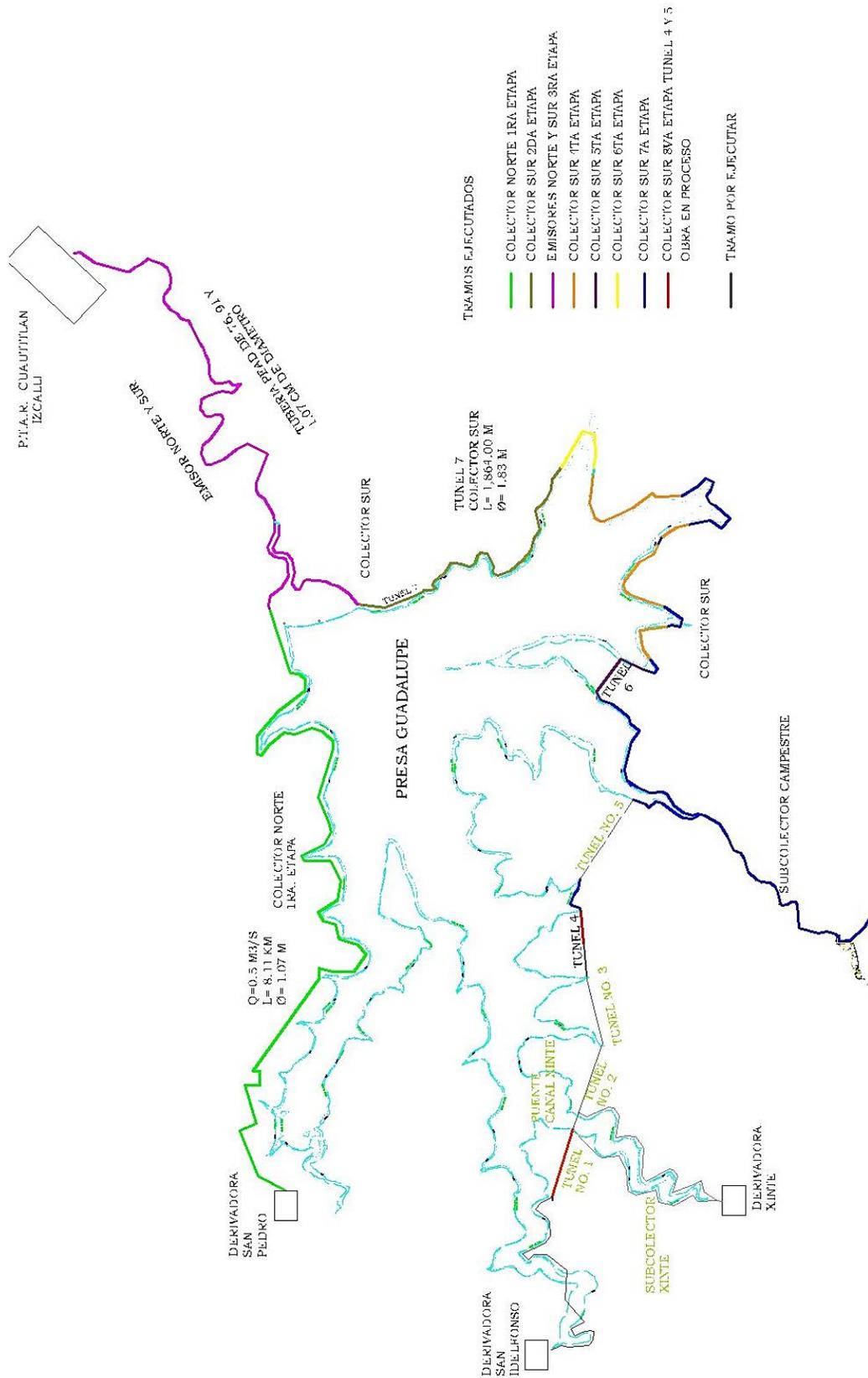
- **Túnel emisor norte y sur (figura 3.a):** esta parte del proyecto es la encargada de conducir los gastos estimados de 2220 lps provenientes de las aguas servidas tanto del colector sur como del norte y tiene una longitud aproximada de 5 km, comenzando cercanamente a la cortina de la presa en la colonia San Francisco Tepojaco y terminando en la colonia La Perla, donde se encuentra ubicada la P.T.A.R. ambas colonias están localizadas en el municipio de Cuautitlán Izcalli del Estado de México.

De forma ilustrativa, se realizaron una serie de cálculos, que nos dan un panorama más amplio y preciso sobre el comportamiento del fluido a través del sistema de tubería, recordando que el diámetro del tubo de concreto es de 1.83 m a lo largo del

colector sur de la presa y con apoyo de datos proporcionados por la Comisión del Agua del Estado de México, como lo son: el gasto mínimo, medio, máximo instantáneo y máximo extraordinario; las cotas y la pendiente en general de la trayectoria sur del colector.

Con una propuesta de un tirante a partir de 1 cm hasta los 1.83 m, en intervalos de 5cm y con la información recavada, fue posible determinar el caudal en función de esos valores, así como su respectiva velocidad (tabla 3.a.1).

Para poder observar con mayor detalle el comportamiento del fluido en diversos tirantes, se elaboró un gráfico que nos permite identificar las variaciones de la velocidad y del caudal (gráfica 3.a.2).



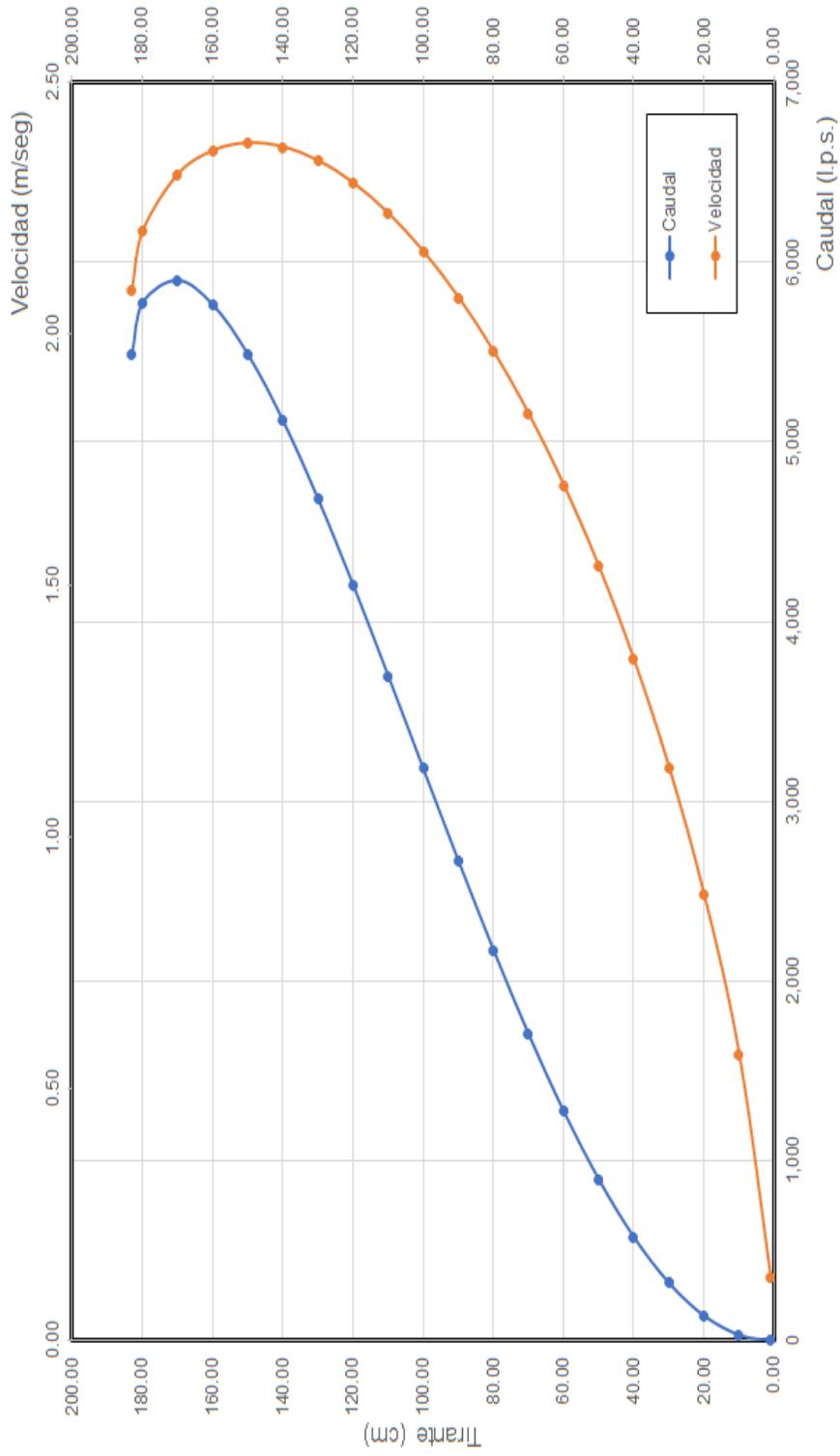
**Tabla 3.a** Estructura general de la Presa Guadalupe. Fuente: elaboración propia.

**FUNCIONAMIENTO DE LA TUBERÍA**

DATOS DE PROYECTO						DISEÑO HIDRÁULICO TUBO LLENO						Trabajo hidráulico, condición mínima							
Tramo	Longitud (m)	Gasto de diseño (l.p.s.)			Pendiente (millesimas)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/seg)	Caudal (l.p.s.)	Tirante mínimo (cm)	Teta (radianes)	Área hidráulica (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	Radio hidráulico (m)	Gasto mínimo (l.p.s.)	Velocidad mínima (m/seg)				
		Mínimo	Medio	Máximo Instantáneo												Máximo extraordinario	Terreno	Plantilla	Terreno
0	391.4	604.52	1209.04	2219.68	3329.54	2,304.92	2,304.57	0.9	1.0	183.0	2.09	5,487.11	1.00	0.296	0.002	0.271	0.007	0.22	0.12
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	10.00	0.944	0.056	0.864	0.065	31.85	0.57
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	20.00	1.348	0.156	1.233	0.126	138.03	0.89
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	30.00	1.667	0.281	1.526	0.184	320.27	1.14
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	40.00	1.946	0.425	1.781	0.239	574.84	1.35
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	50.00	2.200	0.583	2.013	0.289	895.55	1.54
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	60.00	2.439	0.750	2.231	0.336	1274.65	1.70
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	70.00	2.667	0.925	2.440	0.379	1703.14	1.84
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	80.00	2.890	1.105	2.644	0.418	2171.04	1.96
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	90.00	3.109	1.288	2.845	0.453	2667.37	2.07
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	100.00	3.328	1.470	3.045	0.483	3180.25	2.16
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	110.00	3.549	1.651	3.247	0.509	3696.74	2.24
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	120.00	3.775	1.828	3.454	0.529	4202.67	2.30
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	130.00	4.010	1.998	3.669	0.545	4682.33	2.34
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	140.00	4.259	2.159	3.897	0.554	5117.75	2.37
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	150.00	4.529	2.307	4.144	0.557	5487.37	2.38
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	160.00	4.834	2.439	4.423	0.551	5762.79	2.36
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	170.00	5.204	2.548	4.762	0.535	5898.95	2.32
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	180.00	5.770	2.621	5.279	0.496	5773.78	2.20
									1.0	183.0	2.09	5,487.11	183.00	6.283	2.630	5.749	0.458	5487.11	2.09

**Tabla 3.a.1.** Funcionamiento el colector Sur. Fuente: elaboración propia.

### COMPORTEAMIENTO HIDRÁULICO DEL CONDUCTO



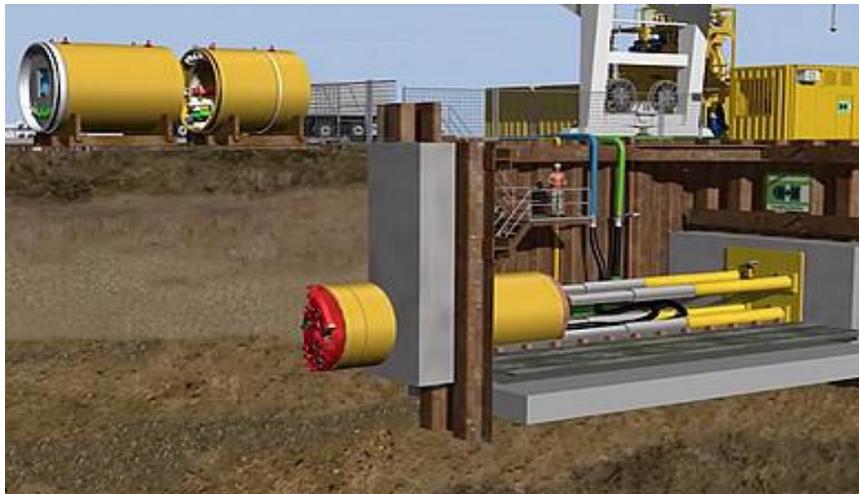
**Tabla 3.a.a.2.** Comportamiento hidráulico del conducto. Fuente: elaboración propia.

#### 4. LAS LUMBRERAS COMO OBRA CONTEMPORÁNEA DE LA INGENIERÍA CIVIL.

Comenzando por la definición de una lumbrera, la cual es una estructura construida como obra auxiliar de obras subterráneas, que puede presentar diferentes formas geométricas acorde a las necesidades de cada proyecto, entre las más comunes destacan las circulares y rectangulares, en túneles de una longitud considerable. Las lumbreras cumplen con dos objetivos, el primero, el cual es acceder a una obra principal: un túnel, en el cual se ingresará equipo, maquinaria, materiales y personal, el segundo objetivo es funcionar como respiradero y acceso para la inspección del túnel, además del mantenimiento de la obra principal, esto cuando se trata de la etapa de operaciones. La excavación de una lumbrera puede alcanzar grandes profundidades, las cuales están en función de las características de cada proyecto.

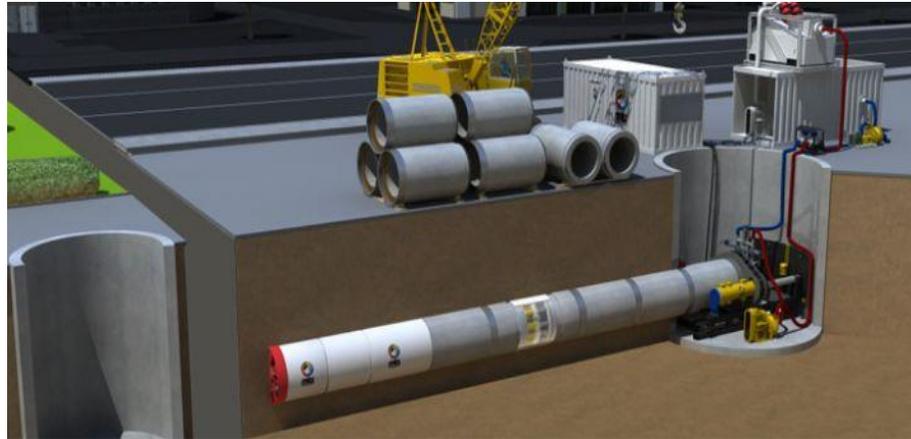
Las lumbreras pueden ser clasificadas en:

- a) Lumbreras de empuje o principal: en esta estructura se instalarán todos los equipos necesarios para el correcto funcionamiento del método Pipe Jacking, y es acceso para la maquinaria necesaria para la construcción del túnel (figura 4.a).



**Figura 4.a.** Esquema general del funcionamiento de una lumbrera de empuje. Fuente: elaboración propia.

- b) Lumbreras de extracción: esta estructura cumple únicamente con la finalidad de ser el espacio donde los equipos y maquinaria empleados sean retirados al finalizar la construcción del túnel (figura 4.b)



**Figura 4.b.** Esquema donde se representa tanto la lumbreira de empuje, así como la de extracción.  
Fuente: elaboración propia.

La lumbreira del presente trabajo se localiza en el colector sur del proyecto integral de la presa Guadalupe y fue una obra auxiliar para la construcción del túnel 4 (figura 4.c).

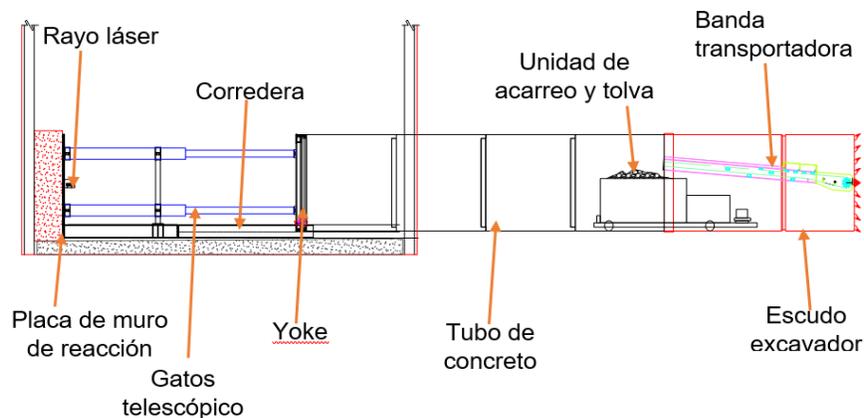


**Figura 4.c.** Ubicación del túnel en el colector Sur. Fuente: Comisión del Agua del Estado de México.

## 4.1 EL MÉTODO PIPE JACKING.

Es un sistema completo de hincado hidromecánico para la tubería de concreto armado de diversos diámetros ubicados dentro de la lumbrera principal y consiste en un sistema de empuje a base de cilindros hidráulicos de hincado, fuente de alimentación, unidad de potencia que es la que transmite el sistema hidráulico, hacia los cilindros principales de hincado, al escudo excavador y a las estaciones intermedias de empuje, sistema de acarreo de rezaga (el cual consiste en rieles, banda transportadora, unidad de acarreo y tolva), estaciones intermedias de empuje que son para auxiliar a la unidad de potencia, y se colocan a intervalos necesarios de acuerdo a la longitud de hincado y a la resistencia del suelo, sistema de lubricación a base de bentonita, control de pendiente basado en un aparato de rayo láser, ubicado adyacente a la pared de apoyo para el empuje, sistema de ventilación y sistema de iluminación (figura 4.1.a).

De acuerdo a un artículo publicado por Sichuan College of Architectural Technology en China, este método rebasa por tiempo y costo al método tradicional de instalación de un sistema de tubería a cielo abierto, resulta de suma importancia realizar los estudios pertinentes de mecánica de suelos, debido a que el suelo en que se trabajará en cada proyecto es variable y puede cambiar de forma drástica, lo que es importante considerar para fines de la estabilidad del material, seguridad del túnel y por supuesto, un plan de contingencia para superar las diferentes características que puedan poseer los estratos de suelo a lo largo del túnel.



**Figura 4.1.a.** Proyecto general colector integral presa Guadalupe. Fuente: elaboración propia.

El método de hincado Pipe Jacking ofrece una visión de menor afectaciones a la superficie, como lo son cierres temporales de principales vías de comunicación, tráfico, deforestación y ruido.

Este método se reduce hasta en un 90% estas afectaciones, haciéndolo el más aplicado en la actualidad en el rubro de las obras subterráneas de gran magnitud, al satisfacer las necesidades tanto constructivas y al no interrumpir las actividades diarias de la población beneficiada en comparación al método tradicional de cielo abierto. Para tener de forma definida los beneficios y desventajas de ambos métodos se presenta la siguiente tabla comparativa (tabla 4.1.b).

<b>Puntos</b>	<b>Pipe Jacking</b>	<b>A cielo abierto</b>
Mínima excavación en superficie	<b>ok</b>	<b>X</b>
Reducidas o nulas interferencias sobre el tráfico	<b>ok</b>	<b>X</b>
Mínima contaminación ambiental por ruido y polvo	<b>ok</b>	<b>X</b>
Ausencia de Perjuicios a comerciantes o terceras personas	<b>ok</b>	<b>X</b>
Menor uso de mano de obra	<b>ok</b>	<b>X</b>
Menor desvíos de líneas de servicio existentes	<b>x</b>	<b>Ok</b>
Menor costo de obras de urbanización, rellenos y pavimentaciones	<b>ok</b>	<b>X</b>
Uso en sistemas de alcantarillado de menor diámetro	<b>x</b>	<b>Ok</b>
Menor o nulo riesgo de pérdidas humanas al tratar de excavar mediante trincheras para diámetros mayores.	<b>ok</b>	<b>X</b>

**Tabla 4.1.b.** Ventajas y desventajas del sistema Pipe Jacking en comparación a cielo abierto.  
Fuente: Elaboración propia.

## **5. INFRAESTRUCTURA ELEMENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA LUMBRERA DEL TÚNEL 4.**

Comencé a desempeñarme como residente de obra en el colector sur presa Guadalupe al mismo tiempo que la obra dio inicio en septiembre de 2017

Al dar inicio a la obra, la C.A.E.M. (Comisión del Agua del Estado de México) se encargó delimitar los espacios de la obra, el superintendente de obra y residente de obra trabajamos en un plan para acomodo e instalación de nuestras áreas de trabajo, posterior se puso en marcha dicho plan y se procedió a la colocación de toda la infraestructura de la compañía, tal como el contenedor que fue asignado como almacén de la obra, un camper el cual fue destinado como oficina móvil para todas las actividades administrativas, así como la ubicación de maquinaria y equipos en espacios aledaños a las zonas de trabajo.

Una de los problemas principales fue el acceso a la obra, debido a que su ubicación es dentro de un fraccionamiento residencial llamado Campestre del Lago, a un costado del Club de Golf Madeiras en el municipio de Cuautitlán Izcalli, lo que dificultó en un inicio el acceso al lugar ya que la hora de entrada de los trabajadores era a las 7:00 hrs, lo que para algunos colonos del fraccionamiento resultaba molesto, debido a la entrada de la unidad de personal, proveedores, movimiento de maquinaria y ruido de los equipos utilizados desde tempranas horas. Uno de los retos a resolver como residente de obra fue realizar una reunión con la presidenta y los colonos del fraccionamiento, explicándoles el objetivo de la obra, sus alcances y beneficios a futuro para el municipio con el fin de obtener un permiso en la caseta para acceder al fraccionamiento sin inconvenientes por el horario de trabajo, amparados con documentos expedidos por la C.A.E.M. Finalmente se logró conciliar el acceso con los colonos.

Otro de los problemas a los cuales nos enfrentamos es a las constantes lluvias, ya que, aunque el acceso es por un fraccionamiento residencial, la obra está ubicada a pie de la presa Guadalupe pasando por alrededor de 2 km de terracería con diferentes niveles de terreno, lo que dificultó el movimiento de la maquinaria y del

personal por zonas de encharcamiento y de abundante lodo (figura 5.a), lo que incluso resultó peligroso para la marcha de la obra en general.



**Figura 5.a.** Condiciones de uno de los accesos principales en época de lluvias. Fuente: elaboración propia.

Como residente de esta obra trabajé en conjunto con el superintendente de obra para elaborar un plan de contingencia ante esta situación, para evitar contratiempos en los avances de la obra y accidentes con el personal. A continuación, se presenta y describe el plan de contingencia propuesto:

**a) Mejoramiento de las principales vías de acceso con tezontle.**

En la época de lluvias el mayor problema para la obra ha sido el acceso del personal, movimiento de maquinaria y recepción de proveedores, ya que las principales vías de acceso a la obra se deterioran por el paso de los escurrimientos durante las precipitaciones y encharcamientos, al ser una zona de terracería.

Se propuso la mejora de los accesos a través de una compactación con ayuda de una excavadora CAT 320 y, por medio de sus trenes de rodamiento y colocación de tezontle de diámetros que van desde 1 hasta 6” con la retroexcavadora CAT 416 para la correcta distribución (figura 5.b) a lo largo del acceso y una compactación adicional, ya que en algunos casos se observó hundimiento del material por lo que fue necesario elaborar una requisición de más camiones de volteo de tezontle (figura 5.c) y agregar nuevamente.



**Figura 5.b.** Mejoramiento de los accesos a la obra. Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.c.** Suministro de tezontle. Fuente: elaboración propia.

**b) Excavación de zanjas y registros:**

A pie de las lomas que rodean la obra, se propuso excavar zanjas con una retroexcavadora CAT 416 (figura 5.d) con la finalidad de transportar los escurrimientos de precipitación pluvial que allí concurren para posteriormente transportar el caudal formado hacia registros (figura 5.e) mediante tubería oculta de PVC (figura 5.f), dichos registros fueron ubicados puntos estratégicos, los cuales desembocan directamente en la presa Guadalupe.

El objetivo es evitar que los grandes escurrimientos afecten las vialidades y que puedan ser transportados a la presa.



**Figura 5.d.** Excavación de zanjas por medios mecánicos. Fuente: elaboración propia.

Una de mis actividades fue supervisar la correcta realización de las tareas asignadas, rendimiento del personal, así como la elaboración de reportes semanales de los avances físicos de la obra.

En cuanto los grandes escurrimientos comenzaron a circular a través de las zanjas y de los ductos de PVC instalados de forma interna en los accesos, se regularizó el paso de unidades y se redujeron de forma drástica los contratiempos.



**Figura 5.e.** Construcción de registros para captar la precipitación pluvial. Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.f.** Desvío de ducto de PVC a pie de la presa Guadalupe. Fuente: elaboración propia.

## 5.1 EQUIPOS Y MAQUINARIA NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN LA LUMBRERA DE EMPUJE DE TÚNEL 4.

1. **Mini excavadora/Retroexcavadora con Martillo:** es empleada para la excavación de la lumbrera, dependiendo el tipo de material a trabajar se adapta el martillo para atacar con mayor eficiencia.
2. **Excavadora:** es utilizada para excavar en mayores volúmenes y es utilizada en espacios donde no es posible acceder con la retroexcavadora por condiciones de los accesos.
3. **Grúa 50 toneladas con tolva y doble malacate:** trabaja en movimientos de materiales, equipos e incluso de maquinaria desde la superficie hasta la lumbrera o viceversa, mientras que la tolva de capacidad 2.32 m<sup>3</sup> se utiliza para cargar el material excavado a altas profundidades y ser retirado y colocado en superficie.
4. **Soldadora de combustión diésel y esmeril:** necesaria para el corte de acero y uniones o detalles entre elementos dentro de la lumbrera.
5. **Volteo/varios:** empleados para el suministro de materiales de relleno como tezontle.
6. **Equipo de oxicorte:** necesario para realizar los cortes necesarios a los troqueles.
7. **Bomba sumergible con manguera de descarga:** indispensable para el retiro de agua acumulado en la excavación de la lumbrera.
8. **Camioneta:** utilizada para el movimiento y traslado de materiales y equipos, así como el personal de la obra.
9. **Vibrador para concreto:** indispensable para el correcto acomodo del concreto dentro del uro de reacción.
10. **Arnés y cuerda de vida:** necesarios para el movimiento seguro del personal dentro de la lumbrera.
11. **Estación total con equipo auxiliar:** este equipo es empleado por el topógrafo de la obra para recabar las coordenadas necesarias conforme al avance y necesidades de la obra.

12. **Nivel con equipo auxiliar:** este equipo también es empleado por el topógrafo y es necesario para detectar desniveles sobre los taludes de la obra, o bien de algún elemento determinado.
13. **Corredera:** Es una sección de vía la cual soporta al tubo que se esté hincando en el momento.
14. **Tolva para colar:** traslada el concreto desde la olla que esté suministrando hasta el elemento que se vaya a colar, su capacidad es de 1 m<sup>3</sup>.



**Figura 5.1.a.** Colocación de malla plastificada en el perímetro de la lumbreira. Fuente: elaboración propia

## 5.2 MATERIALES NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA LUMBRERA DE EMPUJE DE TÚNEL 4.

1. **Herramienta de mano:** tales como pico, pala, cuchara, amarrador, entre otros.
2. **Grillete de seguridad y gancho:** estos elementos son utilizados para sujetar equipos y maquinas desde superficie hacia la lumbrera
3. **Estrobo:** es la preparación de cable trenzado de acero que se une en el grillete y termina en el gancho que se adapta al elemento a mover con la grúa Groove.
4. **Lazo (s):** se atan en alguna esquina del elemento a mover por la grúa y de esta forma guiar y facilitar las maniobras del mismo.
5. **Tablestaca metálica tipo AZ 19-700:** empleada como cimbra lateral del muro de reacción.
6. **Placa soporte para gatos telescópicos:** este elemento cumple dos funciones, la primera ser parte de la cimbra frontal del muro de reacción y la segunda ser el apoyo de los gatos telescópicos, sus dimensiones son: 5cm de espesor, 2.50m de ancho y 3.05m de altura.
7. **Troqueles:** son tramos de viga IPR, empotrados al suelo y colados perimetralmente, que trabajan como refuerzo de la corredera evitando movimientos en cualquier dirección.
8. **Concreto  $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$ :** es necesario para el colado de la losa de fondo de la lumbrera.
9. **Concreto  $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ :** se requiere para el colado del muro de reacción.
10. **Varilla 5/8":** las barras de acero son utilizadas para la construcción del barandal perimetral de la lumbrera, así como de las escaleras para bajar a la lumbrera, además de ser el acero de refuerzo para el muro de reacción.
11. **Alambre recocido:** se emplea para el amarre de las uniones del armado de varilla del muro de reacción.
12. **Espuma de poliuretano:** necesaria para sellar espacios que queden al cimbrar el muro de reacción antes de ser colado.

13. **Grasa:** se utiliza para lubricar la cimbra del muro de reacción y facilitar su retiro al término de la obra.
14. **Malla plastificada:** se coloca sobre el barandal de varilla de 5/8", el objetivo es evitar que grandes objetos puedan rodar desde la superficie y caer a la lumbrera, lastimando al personal que se encuentre laborando (figura 5.1.a).
15. **Letreros de seguridad:** funcionan como aviso o indican algún riesgo que pueda existir en la obra.
16. **Nivel profesional marca truper de 24":** empleada para la correcta alineación de la placa de soporte del muro de reacción y de los gatos telescópicos.

### 5.3 PERSONAL NECESARIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA LUMBRERA DE EMPUJE DE TUNEL 4.

1. **Superintendente de Obra:** revisa que todo el proceso constructivo de la obra se esté ejecutando de acuerdo a los planos emitidos, así mismo es responsable de atender juntas con los directivos, calcular estimaciones y hacer entregas de las mismas a la Comisión del Agua del Estado de México.
2. **Residente de Obra:** reporta diariamente los avances del turno, revisa el estado actual de la excavación, monitorea constantemente los materiales elaborando las requisiciones oportunas de los mismos, gestiona actividades con el personal para que se cumplan en tiempo y tiene trato constante con proveedores. Por otra parte, atiende y soluciona inconvenientes que se presenten en su turno respecto al proceso constructivo de la obra.
3. **Auxiliar Administrativo:** realiza el reporte nominal cada catorcena, así como la programación de gastos para el reembolso de caja chica y de combustible.
4. **Topógrafo:** delimita el perímetro de la lumbrera de empuje mediante coordenadas de la estación total revisando diariamente que las profundidades excavadas para la lumbrera sean las establecidas, calcula los volúmenes trabajados los cuales se reportan al superintendente para el cálculo de estimaciones.
5. **Cabo de lumbreras/Sobrestante:** trabaja en conjunto con el residente, pues a este trabajador se le indican las actividades a realizar a diario y es quien distribuye los trabajos y verifica que se realicen correctamente.
6. **Maniobrista:** trabaja en conjunto con el operador de grúa al hacerle los movimientos corporales necesarios para el traslado de determinados equipos o maquinaria desde la superficie hacia la lumbrera o viceversa
7. **Ayudantes generales:** sus actividades son numerosas tales como limpieza de las unidades, equipos, maquinaria, traslado de herramienta almacén-obra, y apoyo a cualquier oficial que así lo requiera.
8. **Oficial Soldador:** su función principal es realizar cortes, soldar uniones entre elementos de acero, por ejemplo: construcción de barandal perimetral

escaleras de la lumbrera, soldadura de troqueles (viga IPR) a sus soportes y corredera.

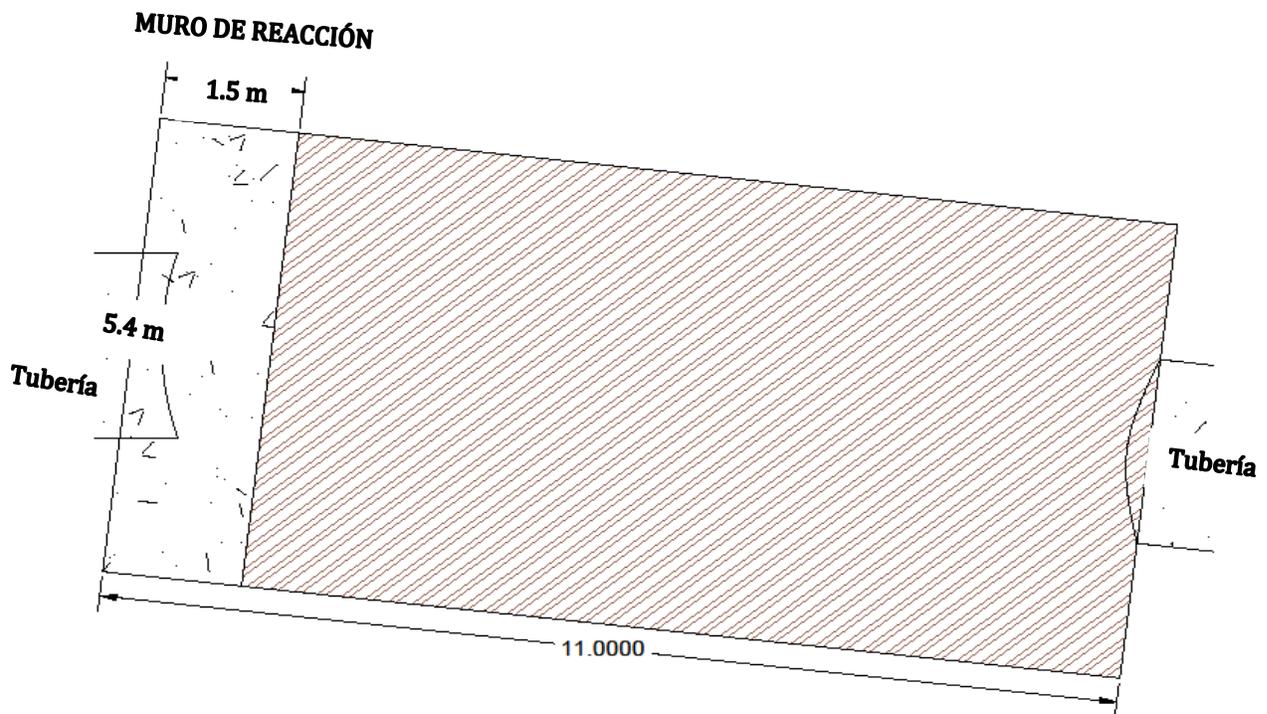
9. **Conductor para camioneta:** traslada equipos y materiales de dimensiones menores, acude a almacenes de los proveedores para recolectar materiales que se han solicitado, así como el movimiento del personal al iniciar y terminar un turno.
10. **Operador de excavadora:** trabaja en la excavación de la lumbrera hasta una profundidad donde el brazo de la maquina lo permita, realiza el movimiento de tierras hasta el banco de material que se encuentra localizado en una zona aledaña a la obra, y realiza las adecuaciones de los accesos hacia la lumbrera.
11. **Operador de grúa:** es encargado del movimiento de equipo y maquinaria de un sitio a otro, además de estar retirando las tolvas que se recaben con el material rezagado por la retroexcavadora.
12. **Operador de mini excavadora/retroexcavadora:** realiza excavaciones de menor dimensión que la excavadora y donde no es posible que su brazo entre, por ejemplo, una profundidad mayor de la lumbrera, donde fue necesario bajar la retroexcavadora con apoyo de la grúa y continuar el rezago de material donde la excavadora no tuvo el alcance necesario.
13. **Oficial eléctrico:** realiza la instalación para la corriente eléctrica de almacén y oficina móvil, así como la preparación de iluminación de la lumbrera y de la toma corriente de uso rudo.
14. **Mecánico:** cuantifica y suministra el combustible a equipos y maquinaria, se comunica con el residente de obra para indicar la cantidad de litros necesarios para trabajar durante 3 días.
15. **Almacenista:** controla la entrada y salida de materiales y herramientas hacia los trabajadores, mantiene un control en el suministro constante de combustible y elabora inventarios mensuales generales.

## 5.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA LUMBRERA DE EMPUJE TÚNEL 4.

Al concluir los trabajos de mejoramiento y acondicionamiento de los accesos principales a la lumbrera de empuje, dieron inicio las actividades primordiales para la construcción del túnel 4.

### 5.4.1 Trazo y nivelación.

De acuerdo al proyecto general de la empresa, se propuso construir una lumbrera rectangular que a su vez fuera estratégica para las maniobras de equipos y maquinas necesarias dentro de ella. (figura 5.4.1.a).



**Figura 5.4.1.a.** Lumbrera de empuje de túnel 4, vista en planta. Fuente: elaboración propia.

En superficie se verificó y se trazó apoyados de una estación total se localizaron las coordenadas principales (figura 5.4.1.b) y se logró trazar el perímetro efectivo de la lumbrera (figura 5.4.1.c).



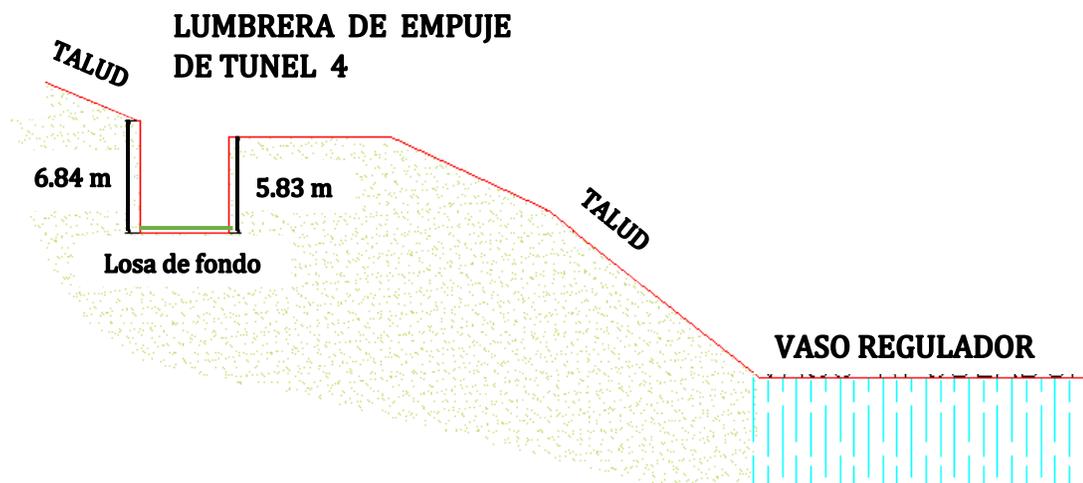
**Figura 5.4.1.b.** Localización de coordenadas principales para el trazo de la lumbrera de empuje de túnel 4. Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.4.1.c.** Perímetro efectivo de la lumbrera de empuje. Fuente: elaboración propia.

#### 5.4.2 Excavación de la lumbrera de empuje.

El nivel de referencia para la excavación no fue el mismo, debido a que el perímetro de la lumbrera coincide con la pendiente del talud mostrado (figura 5.4.2.a), por lo que la profundidad y su nivel respecto al mar para la excavación de profundidad mayor (6.84 m) fue de 2310.67 m.s.n.m. mientras que para la profundidad de excavación menor (5.83 m) fue de 2309.66 m.s.n.m., finalmente la losa de fondo estuvo localizada a 2303.83 m.s.n.m.



**Figura 5.4.2.a.** Perfil de las profundidades de excavación del proyecto. Fuente: elaboración propia.

Antes de dar comienzo a la excavación de la lumbrera de empuje del túnel 4, asigné a algunos trabajadores para la colocación de anuncios de seguridad y cercado de la zona de trabajo (figura 5.4.2.b y 5.4.2.c) para cumplir con los lineamientos establecidos por la Comisión del Agua de Estado de México.



**Figura 5.4.2.b.** Preparación de anuncios de seguridad. Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.4.2.c.** Colocación de cerca y anuncios de seguridad en los límites de la lumbrera 4.

Fuente: elaboración propia.

Una vez colocados los anuncios y haber cercado el perímetro de la lumbrera, se dio inicio a la excavación (figura 5.4.2.d) con la excavadora CAT 320.



**Figura 5.4.2.d.** Proceso de excavación de la lumbrera 4. Fuente: Elaboración propia.

Al llegar a una profundidad donde el brazo de la excavadora no era suficiente para continuar con los trabajos de extracción de material, se optó por bajar la retroexcavadora CAT 416 apoyándonos con la grúa Grove RT600E para retomar la excavación. (figura 5.4.2.e y 5.4.2.f).



**Figura 5.4.2.e.** Se baja retroexcavadora para continuar excavación de lumbrera de empuje 4.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.4.2.f.** Continuación de la excavación de la lumbrera 4 con retroexcavadora. Fuente: elaboración propia.

Con los datos del área en planta de la lumbrera, las profundidades de excavación requeridas y mediante la evaluación de la eficiencia de la excavadora CAT 320 y retroexcavadora CAT 416 así como del operador de éstas, me fue posible determinar el rendimiento de la jornada y fijar una fecha estimada de término de esta actividad, para la programación del envío de los materiales y equipos necesarios para la construcción del túnel 4 y tener el tiempo suficiente para acondicionar la superficie para el acomodo de los mismos.

Debido a que las actividades se desarrollaron durante la época de lluvias, se presentaron diversos contratiempos en la excavación de la lumbrera 4 al no alcanzarse una buena profundidad de avance por la inundación de la zona de trabajo (figura 5.4.2.g), por lo que se programó una requisición de material para la compra de una bomba de extracción y manguera para la expulsión del agua acumulada y así poder retomar los trabajos lo antes posible.



**Figura 5.4.2.g.** Expulsión de agua acumulada en excavación de la lumbreira de empuje. Fuente: elaboración propia.

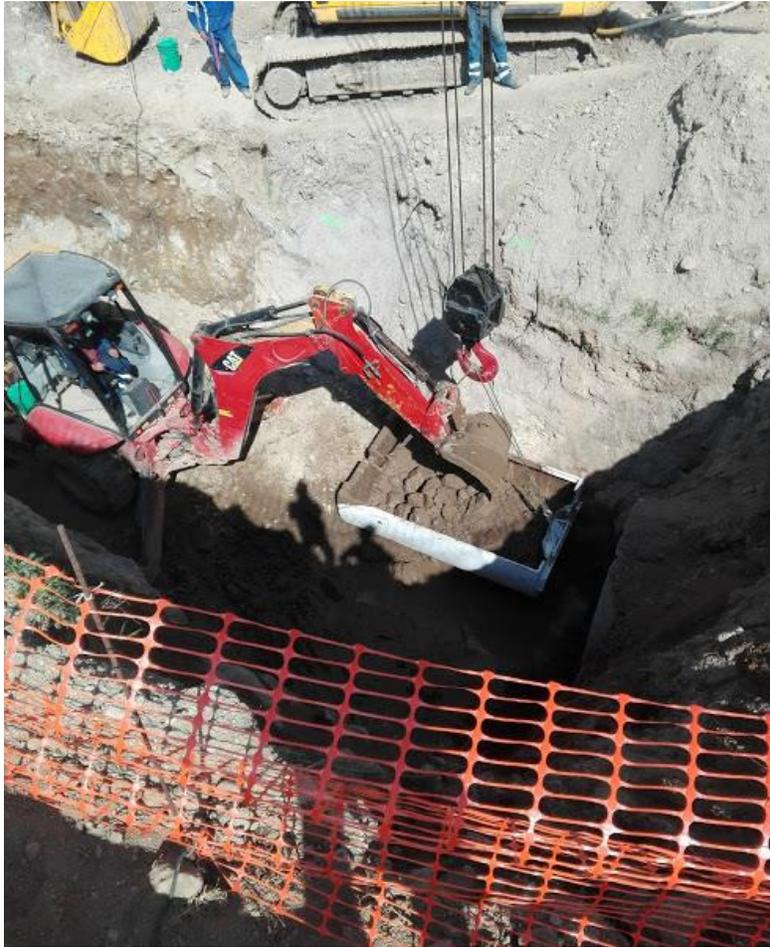
Durante el desarrollo de las actividades se presentaron retrasos mayores en la excavación ya que se encontró material compuesto por rocas de diversos diámetros, lo cual no fue detectado en los trabajos de prospección.

Se tuvo que solicitar el envío de un martillo hidráulico (figura 5.4.2.h) de la retroexcavadora que a su vez fue cambiado por el bote con el que venía operando, para poder retirar esas rocas sin grandes pérdidas de tiempo.



**Figura 5.4.2.h.** Adaptación del martillo hidráulico a la retroexcavadora CAT 416 por el mecánico de la obra. Fuente: elaboración propia.

El material excavado era retirado mediante la tolva de acero, realizando las maniobras correspondientes por medio de la grúa Groove RT600E. (figura 5.4.2.i).



**Figura 5.4.2.i.** Llenado de tolva con material excavado. Fuente: elaboración propia.

El material retirado producto de la excavación era vaciado a los alrededores en superficie, y después compactado por la excavadora, con la finalidad de tener un espacio de trabajo más estable.

Otro de las actividades que generó retraso fue el cambio del martillo hidráulico por el bote de la retroexcavadora CAT 416, cada vez que se tenía que retirar el material extraído.

En función a los avances de excavación que se reportaban diariamente, se tenía que realizar una revisar topográfica (figura 5.4.2.k) periódica para detectar cualquier anomalía que no estuviera en los alcances del proyecto.



**Figura 5.4.2.k.** Vaciado de material excavado a orillas de la presa. Fuente: elaboración propia.

Una vez alcanzada la profundidad solicitada por el proyecto, se perfiló y delinearon las cuatro paredes de la lumbrera y la losa de fondo, empleando la retroexcavadora y su martillo hidráulico (figura 5.4.2.l).



**Figura 5.4.2.l.** Perfilado de muros de la lumbrera de empuje. Fuente: elaboración propia.

### **5.4.3 Losa de fondo de la lumbrera de empuje.**

Concluyendo los trabajos de retiro de material para la construcción de la lumbrera, se excavaron 4 espacios adicionales de 60 cm de profundidad respecto al del nivel

de la losa de fondo para la colocación de los troqueles y una excavación adicional circular para la colocación de un cárcamo de bombeo, para crear estos espacios se empleó un taladro tipo hilti T-1000 ya que el martillo hidráulico de la retroexcavadora no detalla de forma precisa espacios de menores dimensiones.

Al terminar de excavar los cinco espacios para los cuatro troqueles y el cárcamo de bombeo, se revisó junto al topógrafo de la obra que la losa de fondo tuviera la pendiente necesaria para el desvío del agua pluvial y propia del proceso de hincado, hacia al cárcamo de la lumbrera (figura 5.4.3.a).



**Figura 5.4.3.a.** Revisión topográfica de los niveles de la losa de fondo de la lumbrera. Fuente: elaboración propia.

Posterior a la revisión de los niveles de la base de la losa de fondo y la correcta colocación de los cuatro troqueles, cuantifiqué su volumen de concreto (cálculos abajo mostrados), en relación a los 10 cm de espesor que solicita el proyecto y del área en planta conocida, además de considerar los espacios adicionales que se excavaron.

$$\text{Volumen} = (\text{Área en planta de la lumbrera})(\text{espesor de la losa})$$

$$\text{Volumen} = (11.0\text{m})(5.40\text{m})(0.10\text{m}) = 5.94\text{m}^3$$

Calculando los volúmenes de los espacios adicionales excavados:

$$\text{Volumen de troqueles} = (\text{área en planta})(\text{profundidad})$$

$$\text{Volumen de troqueles} = (0.6m \times 0.4m)(0.6m) = 0.144m^3$$

$$\text{Volumen de cárcamo} = \left( \frac{(\pi)(0.6m)^2}{4} \right) (0.6m) = 0.169m^3$$

Por lo que el volumen total sería la suma de todos los volúmenes antes calculados.

$$\text{Volumen total} = 5.94 + (4 \times 0.144) + 0.169 = 6.685m^3$$

Considerando un desperdicio de 5% del volumen total, obtuve:

$$\text{Volumen real} = (1.05)(6.685) = 7.02m^3$$

Por lo que se realizó la programación de concreto por  $7.5m^3$ , a un día posterior de cuando se dio el visto bueno a la excavación y nivelación de la losa de fondo.

Dentro de las actividades encomendadas como residente de obra, se supervisó el colado en general (figura 5.4.3.b), prever las herramientas y materiales necesarios para realizar esta actividad, revisar que el espesor de la losa fuera consistente y uniforme, asignar actividades a los trabajadores, atender cualquier situación o imprevisto que se llegara a presentar y firmar la nota de remisión del proveedor de concreto verificando que las características del concreto fueran consistentes en relación al catálogo de conceptos de la obra.



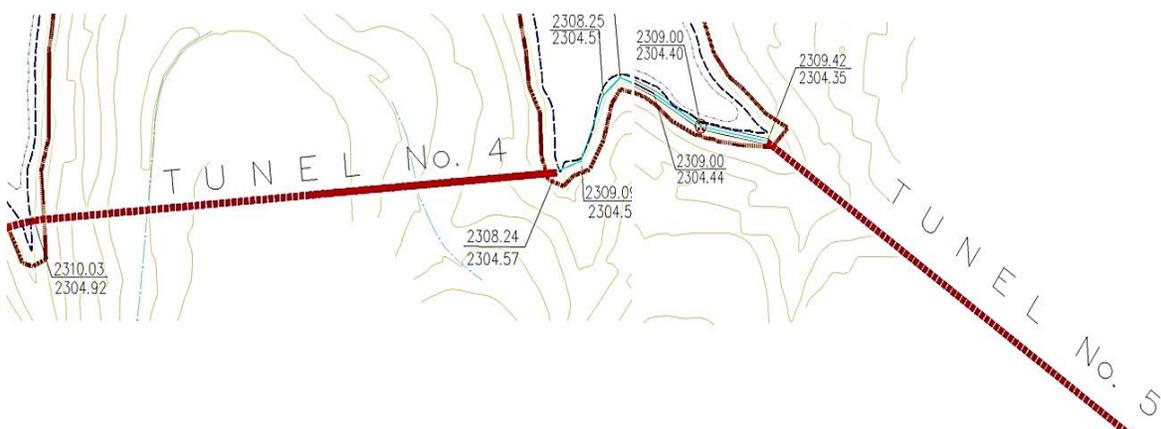
**Figura 5.4.3.b.** Supervisión del colado de la losa de fondo de la lumbrera de empuje del túnel 4.  
Fuente: elaboración propia.

Una vez concluidos los trabajos del colado de la losa de fondo de la lumbrera, trabajé en conjunto con el topógrafo para hacer una revisión final de dicha estructura. (figura 5.4.3.c). Es importante señalar que la nivelación de la losa fue crucial en el desarrollo de la obra, ya que es la referencia fundamental para los siguientes trabajos de la obra, debido a que esta nos delimita los diversos puntos para la alineación y acomodo de la infraestructura indispensable dentro de la lumbrera, tales como corredera, alineación de escudo excavador y gatos telescópicos. Una mala nivelación podría ocasionar variaciones en las coordenadas del túnel.



**Figura 5.4.3.c.** Revisión de los niveles de la losa de fondo con apoyo de la estación total. Fuente: elaboración propia.

El túnel 4 conecta a un tramo de tubería que ya se había instalado con anterioridad a cielo abierto, dicho tramo está localizado entre el túnel 4 y 5 (figura 5.4.3.d, tramo marcado con color azul), haciendo conexión de ambos túneles, la cual cuenta con 3 bocas de tormenta que permiten el paso del agua pluvial y tienden a salir hacia la lumbrera de trabajo actual, por lo que se tuvo que colocar y soldar una tapa de metal forjado, conocida como “comal” (figura 5.4.3.e), con el objetivo de sellar la salida de agua que pudiera salir hacia la lumbrera.



**Figura 5.4.3.d.** Vista en planta de la lumbrera 4, la trayectoria entre el túnel 4 y 5 representa el túnel que fue construido mediante el método a cielo abierto. Fuente: Comisión del Agua del Estado de México.



**Figura 5.4.3.e.** Se suelda “comal” de la boca de del último tramo de tubería instalada a cielo abierto. Fuente: elaboración propia.

Una vez que se terminó de fijar “el comal” mediante soldadura, se procedió a bajar la corredera a la lumbrera de empuje (figura 5.4.3.f) para su posterior colocación y alineación con respecto al eje del proyecto y con soportes de viguetas soldados desde la corredera hacia los troqueles a 45° (troqueles) que tienen como finalidad evitar el movimiento del eje principal del túnel.

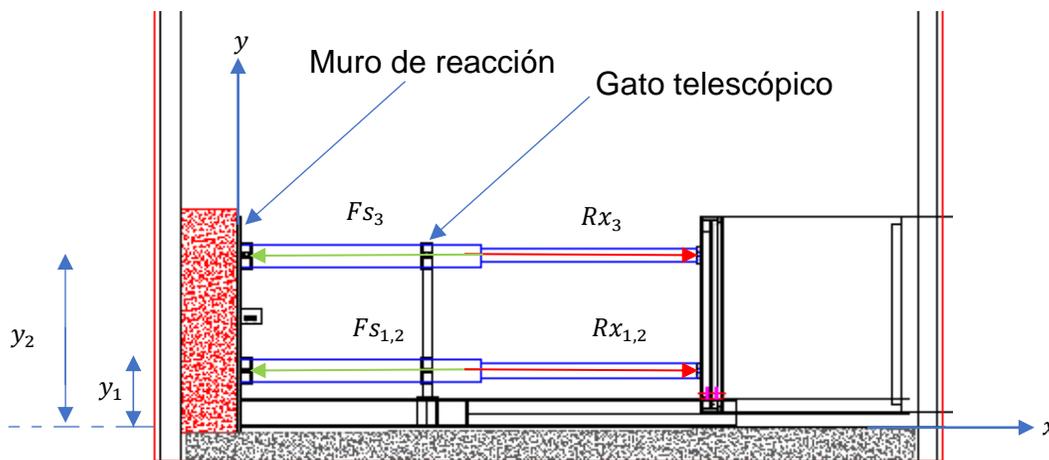


**Figura 5.4.3.f.** Se baja corredera a lumbrera de empuje del túnel 4. Fuente: elaboración propia.

#### 5.4.4 Muro de reacción.

Como parte del sistema de hincado de tubería de concreto Pipe Jacking se debe construir un muro de reacción que sea capaz de soportar las reacciones de las fuerzas de los gatos telescópicos en este procedimiento de hincado, y a su vez de mantenerlos estáticos en la placa de soporte de acero que forma parte del muro y que está ubicada en dirección perpendicular de la línea de hincado.

A continuación, se presenta un croquis que nos indica de forma general la forma en que se transmiten dichas fuerzas ejercidas por el sistema hidráulico (figura 5.4.4.a).



**Figura 5.4.4.a.** Diagrama de fuerzas ejercidas por el sistema hidráulico hacia el muro de reacción.

Fuente: elaboración propia.

Donde:

$F_s$  = Fuerza producida por el sistema hidráulico en operación,

los subíndices indican el número de gato hidráulico.

$R_x$  = fuerza de reacción generada por el muro, los subíndices indican el número de gato hidráulico.

$y$  = indica la altura medida desde el suelo hasta el centro del embolo del gato telescópico,

Tanto  $y_1$  como  $y_2$  son valores constantes, los cuales son 0.75 y 1.75 m respectivamente.

Entre las actividades realizadas, fue solicitar el material, herramientas y equipo necesario para la construcción del muro antes mencionado, en este caso la tolva

para colado, y materiales como: varillas para el refuerzo del muro, alambre, concreto y su vibrador, entre otros.

Dentro de la empresa realicé la requisición de los materiales y solicité el movimiento de los equipos que se encontraban en otras obras de la misma compañía a nuestra obra y así poder llevar acabo de forma oportuna la construcción del muro de reacción.

El primer paso para la construcción del muro de reacción es delimitar la superficie donde estará ubicado dicho muro, como actividad en paralelo se habilitó en superficie un armado de acero con varilla de 5/8" para refuerzo de este elemento. Una vez que el armado de varilla se encontraba listo, se procedió a bajarlo a la lumbrera y acomodarlo al centro del muro (figura 5.4.4.b).



**Figura 5.4.4.b.** Colocación y alineación de acero de refuerzo del muro de reacción. Fuente: elaboración propia.

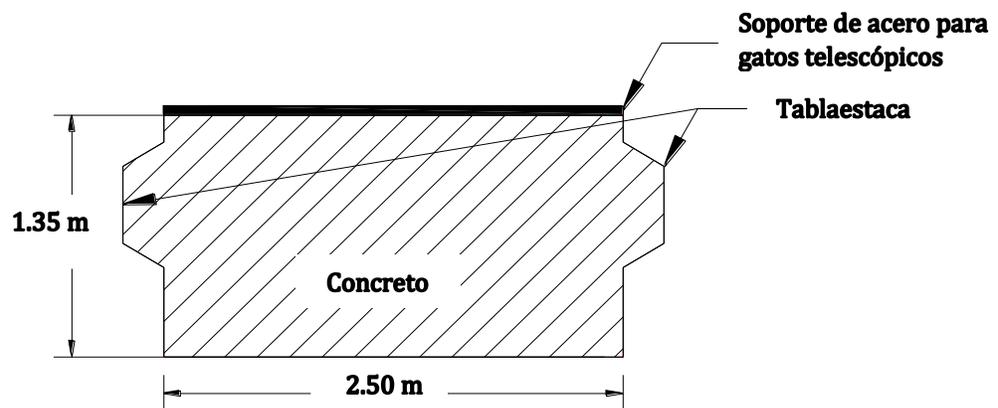
Posterior, se colocó y se alineó con el nivel profesional Truper de 24" la placa de soporte de los gatos (figura 5.4.4.c), cabe mencionar que este paso es vital para la construcción del túnel ya que debe estar completamente perpendicular al eje del proyecto para que el sistema de tubería se conecte en el punto establecido de la lumbrera de extracción, por lo que es importante revisar y verificar esta actividad.



**Figura 5.4.4.c.** Colocación y alineación manual de la placa de soporte del muro. Fuente: elaboración propia.

Al concluir los trabajos de acomodo y alineación de la placa, Se colocaron tablestacas laterales para cerrar completamente el muro, sellando los espacios con espuma de poliuretano para evitar fugas de concreto y se colocó grasa en todo el interior de la cimbra como preparación para el suministro de la mezcla.

Una vez que se terminó de colocar toda la cimbra del elemento, realicé un levantamiento del muro de reacción (figura 5.4.4.d) para calcular la cuantificación de concreto y levantar su correspondiente requisición con nuestro asesor comercial.



**Figura 5.4.4.d.** Sección del muro de reacción (vista en planta). Fuente: elaboración propia.

Este croquis lo elaboré con apoyo del programa AutoCAD, el cual me arrojó un área y un volumen preciso, y por criterio propio sólo consideré un desperdicio del 5%,

solicitando con estos datos un volumen final de 11.5 m<sup>3</sup> de concreto, en dos ollas, una de 6 m<sup>3</sup> y la siguiente de 5.5 m<sup>3</sup>, con un intervalo de tiempo entre cada una de ellas de 60 minutos. Como experiencia personal no se respetaron esos tiempos debido a la dificultad para acceder a la obra.

Al recibir las ollas de concreto, verifiqué en el documento de remisión del proveedor que todas las características de la mezcla coincidieran en base a lo solicitado, como lo es: el tiempo de fraguado, revenimiento, resistencia a la compresión, tamaño del agregado, y volumen suministrado entre las más importantes, así como datos de la empresa.

Al dar el visto bueno y firmar la hoja, se procede a vaciar el concreto en la tolva de acero que después es trasladada hacia el muro de reacción (figura 5.4.4.e). Después de terminar de vaciar cada una de las tolvas se introduce un vibrador de concreto a la mezcla para evitar que queden espacios vacíos dentro del elemento, y se repite el mismo proceso hasta llegar a la máxima capacidad del muro de reacción (figura 5.4.4.f).



**Figura 5.4.4.e.** Suministro y traslado de concreto mediante tolva. Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.4.4.f.** Vaciado de concreto premezclado en el muro de reacción. Fuente: elaboración propia.

## 6. INFRAESTRUCTURA ELEMENTAL PARA EL PROCESO DE HINCADO DEL TÚNEL 4 POR EL METODO PIPE JACKING.

Al concluir completamente los trabajos de construcción de la lumbrera de extracción, la actividad consecuente es preparar los espacios necesarios para la llegada de los equipos indispensables del propio sistema de hincado Pipe Jacking.

Como responsabilidad del residente de obra, es la oportuna programación de las plataformas para la llegada de dichos equipos y revisar las condiciones de los mismos al llegar a la obra y gestionar el correcto movimiento y acomodo de los mismos con la grúa y el maniobrista, siendo el escudo excavador el que requiere mayor precaución por su alto peso (figura 6.a).



**Figura 6.a.** Recepción de rieles, unidad de potencia P-600 y escudo excavador. Fuente: elaboración propia.

## 6.1 EQUIPOS Y MAQUINARIA NECESARIOS PARA EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE HINCADO.

1. **Escudo Lovat de frente presurizado diámetro de 88”**: su función primordial es la excavación de la línea del túnel mediante picas de corte que se encuentran distribuidas a lo largo de sus 6 brazos frontales y en el perímetro del escudo llamadas “picas de sobrecorte”, estas picas estarán penetrando el suelo y con el giro de la cabeza del escudo en operación se desprenderá la corteza del suelo en función al avance de empuje que se presente (figura 6.1.a).
2. **Unidad de potencia Modelo P600 marca Akkerman**: es un sistema hidráulico que trabaja en conjunto con los gatos telescópicos, se controla por medio de válvulas que regulan la presión de empuje y por mangueras que los conectan entre sí trabajando a través de aceite hidráulico.
3. **Pistones de empuje Granite o gatos telescópicos**: transmiten la presión necesaria al yoke para que permita el correcto hincado de tubería. Cada uno está compuesto por dos cilindros, el primero en trabajar es el de diámetro menor con una longitud máxima de 1.50 m y un diámetro de 10”, mientras que el cilindro mayor tiene una longitud máxima de 1.40 m y un diámetro de 12”, cada uno de ellos trabaja en función de la longitud de tubo que se ha hincado (figura 6.1.a).
4. **Unidad para la inyección de bentonita Leadcrete**: lubrica el túnel en el diámetro exterior del tubo que está siempre en contacto con la corteza de suelo, reduciendo las presiones de empuje de los gatos telescópicos.
5. **Tanque de hidratación de bentonita y de enfriamiento del escudo excavador**: se conecta directamente a la unidad de bentonita y abastece de agua a la unidad de inyección de bentonita para preparar el lodo que después será inyectado a la línea del túnel. Por otro lado, el agua de este contenedor trabaja en el enfriamiento del escudo cuando este está trabajando constantemente.
6. **Unidad de acarreo Microtunnel**: traslada el material rezagado por el escudo excavador, desde la parte inicial del túnel hasta la lumbrera de

empuje del túnel, donde dicho material es extraído por la grúa y depositado en un lugar determinado en superficie. Se localiza justo detrás de la banda transportadora y está conformado por una unidad móvil y una tolva de acarreo (figura 6.1.a).

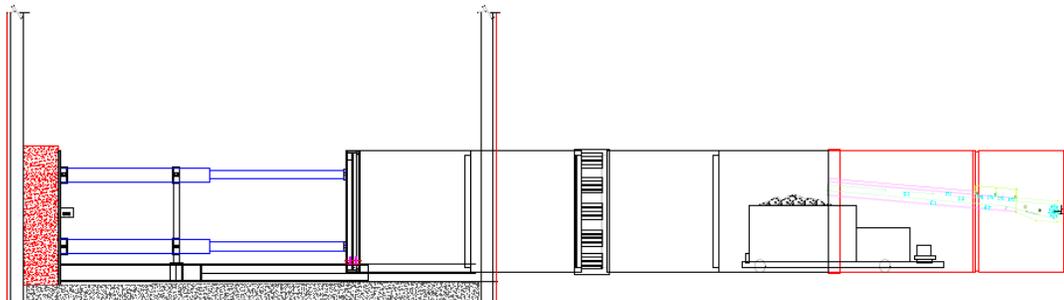
7. **Bomba de ventilación:** es utilizada para llevar el aire a temperatura ambiente de superficie a personal que se encuentra trabajando dentro del túnel.
8. **Generador de energía CAT XQ 400:** produce la energía eléctrica necesaria para alimentar el escudo excavador, la unidad de potencia P-600, unidad de inyección de bentonita Leadcrete, bomba hidráulica del tanque de enfriamiento, iluminación de la lumbrera en general y la bomba de aire.
9. **Grúa 50 toneladas con tolva y doble malacate:** indispensable para maniobras con maquinaria y equipos de gran peso, así como el retiro de tolvas con material rezagado dentro de la lumbrera de empuje, por otra parte, su uso es fundamental para bajar tubos de concreto hacia la lumbrera y desde la plataforma del proveedor cuando hay suministro de tubería.
10. **Sistema de iluminación:** empleado para la iluminación del recorrido dentro del túnel y de la superficie cuando hay operaciones de hincado en el turno nocturno.
11. **Tanques de almacenamiento de agua:** se encuentran localizados en superficie y se utilizan para la higiene personal de los trabajadores.
12. **Sistema de estaciones intermedias de empuje a base de gatos Granite:** su función clave es distribuir la presión principal de los gatos telescópicos principales que se ubican en la lumbrera de empuje, las cuales se alivian en un sistema de sub-presiones dentro del túnel, evitado que en largas distancias las presiones principales puedan afectar la estructura de los tubos.
13. **Rayo láser:** cumple una función principal en la pendiente y ubicación del túnel, trabajando como un punto específico de color rojo que se transmite desde una base adaptada a la placa del muro de reacción en la lumbrera

de empuje, hasta el frente de excavación en ese momento. Siendo también una guía para el operador de empuje y para el topógrafo que servirá para detectar alguna anomalía en el proceso constructivo de hincado de la línea del túnel (figura 6.1.a).

14. **Corredera:** es un elemento adaptado en la parte inferior del muro de reacción en sentido a la línea del proyecto, y es el espacio de desplazamiento de la unidad de rezaga dentro de la lumbrera de empuje, sobre de ella se realizan las maniobras para el retiro de material rezagado transportado desde el inicio del escudo excavador (figura 6.1.a).
15. **Bomba hidráulica 1 HP:** transporta el agua contenida en el tanque de almacenamiento hacia la alimentación de la unidad Leadcrete y por otro lado el sistema de enfriamiento localizado dentro del túnel.
16. **Banda transportadora:** es un elemento que forma parte del escudo excavador y se encuentra localizado justo al centro del mismo, unido mediante una argolla al frente del escudo y hasta la parte final del mismo, sostenida por cables tensores. La finalidad de la banda transportadora es estar en constante movimiento retirando el material rezagado cuando el escudo excavador está en operación (figura 6.1.a).
17. **Rieles para tránsito de unidad de acarreo:** son la principal vía de acceso para la unidad de acarreo, desde el inicio del túnel en la lumbrera de empuje hasta la conexión a la adaptación del escudo excavador.
18. **Camioneta pick up:** es la unidad que traslada al personal desde la entrada del campamento hasta la entrada de la lumbrera, también es empleada para el traslado de pequeñas y medianas refacciones, así como herramienta desde el almacén.
19. **Placa de empuje:** es el apoyo principal de los gatos telescópicos, este elemento se alinea a un ángulo preciso de 90° en relación al eje principal del proyecto (figura 6.1.a).
20. **Yoke:** este elemento de acero es el segundo soporte de los gatos telescópicos, en él se podrán colocar hasta cuatro gatos telescópicos, aunque para fines prácticos del proceso se llega a trabajar hasta con solo

tres de ellos. Su objetivo principal es transmitir de manera uniforme la presión que emiten los gatos telescópicos hacia la línea de tubería que se esté hincando (figura 6.1.a).

21. **Excavadora:** se opera en superficie para el acomodo de material que se ha rezagado en el túnel y que ha sido depositado por la tolva y la grúa Groove.
22. **Audífonos con micrófono y línea de comunicación:** es el medio de notificación entre el operador de empuje y de escudo, el sistema está conformado por un par de audífonos para operador y están conectados en una línea de comunicación que recorre todo el avance que en ese momento presente el túnel.
23. **Roto martillo y taladro hilti:** se emplea al encontrar segmentos estratos con roca los cuales son devastados con estos equipos para evitar el desgaste de las picas del escudo excavador.



**Figura 6.1.a.** Equipos y partes elementales del túnel y de la lumbreira de empuje. Fuente: elaboración propia.

## 6.2 MATERIALES GENERALES UTILIZADOS EN LA OPERACIÓN.

1. **Madera para anillos (cerchas):** son elementos compuestos de madera comprimida de espesor igual a 6mm, que son pegados con Resistol 5000 en el área que se forma entre el exterior menos el diámetro interior, dejando herméticas las uniones entre la unión de cada tubo.
2. **Bentonita marca Perfobent:** suministrada en sacos de 50 kg, es un material que se mezcla con agua en la unidad de inyección y su función

principal es la lubricación del túnel a través del diámetro exterior de los tubos de concreto y su contacto directo con el suelo.

3. **Agua:** es empleada en diferentes actividades, las principales son la preparación de lodo bentonítico y el enfriamiento constante del escudo excavador.
4. **Aceite hidráulico:** se suministra de forma periódica al tanque del escudo excavador para la correcta realización de sus actividades mecánicas.
5. **Oxígeno y acetileno:** lo utiliza el oficial soldador para hacer cortes de acero, fabricación de adaptaciones para los rieles, entre otras.
6. **Grasa:** es suministrada en maquinaria y equipos para su correcta lubricación.
7. **Soldadura:** empleada para trabajos de unión de piezas de acero.
8. **Pintura en aerosol:** se requiere para marcar e identificar el número de tubo que se está trabajando y además para la localización de puntos de referencia del topógrafo.
9. **Placa rolada de acero de 1/4":** envuelve el sistema de estaciones intermedias de empuje para poderla adaptar al tubo que se determine que lo requerirá.
10. **Diésel:** es el combustible indispensable para el funcionamiento general de obra, pues de él depende la maquinaria y el generador principal de corriente eléctrica.
11. **Torzales de alambre recocido:** son elementos de 30 cm de largo que se fijan dentro de todos los tubos de concreto del túnel y soportan las líneas tanto de agua, bentonita, ventilación y comunicación.
12. **Taquetes expansivos:** ayudan a fijar los torzales en el tubo de concreto.
13. **Manguera de 2" para líneas de agua:** utilizada para conexión de líneas de agua tanque de almacenamiento-inicio del túnel y para la línea unidad de inyección de bentonita-inicio del túnel.
14. **Manguera flexible de 2" para estaciones intermedias:** son conectadas directamente de la unidad de potencia P-600, hasta el lugar

donde estén localizadas las estaciones intermedias de empuje, las cuales trabajan mediante aceite hidráulico transmitiendo las presiones necesarias para el hincado.

15. **Brocas de diversos diámetros:** son elementos metálicos, que se cambian al taladro/rotomartillo para fabricar perforaciones circulares en determinados materiales de la obra.
16. **Tubo de concreto armado diámetro interior de 1.83 m y exterior de 2.17 m y longitud de 2.50 m:** conformado en un extremo por una virola de acero y en el otro por una campana, las cuales embonan entre la unión de los tubos en la línea del proyecto. La presencia del tubo de concreto es indispensable para los trabajos de construcción del túnel. Existen dos tipos de tubo para el proceso: el primero es llamado “tubo liso” y como característica principal no posee ningún oficio interno que tenga alcance al diámetro exterior; el segundo tipo es nombrado “tubo para inyección de bentonita” y está acondicionado con tres orificios interiores ubicados a la mitad de la longitud efectiva del tubo y distribuidos a 120°, dichos orificios tienen un alcance hasta el diámetro exterior y tienen como función la adaptación de la línea de inyección de bentonita que permita la salida del líquido y proporcionando la lubricación necesaria del túnel entre la superficie de concreto del tubo y el suelo.
17. **Resistol 5000:** necesario para pegar las cerchas al tubo de concreto.
18. **Cable:** sus características varían dependiendo la maquina o equipo a la cual se le estará suministrando corriente eléctrica, en el caso del escudo excavador, por ejemplo, es necesario emplear un cable calibre cuatro ceros.
19. **Tubo galvanizado de 2”:** es parte de las líneas de agua y de bentonita dentro del túnel.
20. **Tubo de PVC de 6”:** es parte de la línea de ventilación dentro del túnel.
21. **Coples de PVC de 6”:** necesarios para la unión entre cada tramo de PVC en la línea de ventilación interna del túnel.

22. **Herramienta menor:** tales como palas, picos, martillos, desarmadores, entre otros.
23. **Cable para micrófono 24 AWG:** forma parte de la línea de comunicación y conecta los audífonos con micrófonos tanto del operador de empuje como de escudo excavador.
24. **Picas de tungsteno:** se deben tener como repuesto para el momento en que las picas actuales del escudo presenten un desgates significativo.
25. **Focos de 100 W:** indispensables para la correcta iluminación a lo largo del túnel.
26. **Tablero de interruptores:** conformado por diversos interruptores para manipular el funcionamiento de equipos y maquinaria como el escudo excavador, la unidad de inyección de bentonita, bomba de ventilación, entre otros.
27. **Cable calibre 8 de uso rudo:** se habilita para el alumbrado interior del túnel.
28. **Tuercas de 7" y tuercas de mariposa:** se empelan para la unión de rieles dentro del túnel.

### **6.3 PERSONAL NECESARIO PARA EL HINCADO DE TUBERÍA DEL TUNEL 4 POR EL METODO DE PIPE JACKING.**

1. **Superintendente de Obra:** es el responsable general de la obra y su función primordial es verificar y reportar al director general de la empresa los avances día con día la longitud efectiva en el avance del proyecto, por otra parte debe calcular semanalmente las estimaciones de los avances que se presente y entregarlos en las oficinas de la Comisión del Agua del Estado de México, por otro lado trabajar en conjunto con el residente de obra para dar premura a las actividades de mayor importancia en determinadas circunstancias, además de la contratación de personal y dar el visto bueno al formato de nóminas quincenal.

2. **Residente de Obra:** mantiene un contacto estrecho con el superintendente para enviar los reportes de avances por cada periodo de tolva que se extraiga del túnel, revisará la correcta lubricación del túnel con lodo bentonítico. Por otra parte, es responsable de monitorear que los materiales sean suficientes para cubrir las necesidades de la obra de forma semanal y por ende, realizar las requisiciones de los materiales que se encuentren escasos estando en contacto con el área de compras para dar seguimiento al envío de los mismos, así como gestionar su entrega con el área de almacén y proveedores, también deberá proponer soluciones para poder resolver cualquier imprevisto o contratiempo que se presente y afecte la operación del hincado, también estará organizando juntas con sus trabajadores de turno para mejorar áreas de oportunidad y mejorar los rendimientos diarios en caso de que se requiera.
3. **Auxiliar Administrativo:** elabora las nóminas de todo el personal que labora en la obra, atendiendo aclaraciones y dudas de los trabajadores respecto a sus pagos, así como recibir y hacer llegar al área de recursos humanos los justificantes o incapacidades, también estará preparando la programación de los depósitos para los pagos de renta tanto para la casa del personal de confianza como de los trabajadores así como del combustible que se estará consumiendo semanalmente producto de la operación del hincado.
4. **Topógrafo:** sus funciones juegan un rol muy importante en el proceso de hincado de tubería ya que es el responsable de verificar que el eje del proyecto se respete durante toda la longitud total del túnel, revisando diariamente la pendiente y la alineación del sistema.
5. **Sobrestante o maestro de obra del frente de Lumbreras y frente de hincado:** su función es asignar las actividades a su cuadrilla que le sean indicadas por el residente de obra, verificar que se realicen correctamente y al final del turno reportar el avance correspondiente.
6. **Operador de escudo:** es responsable de realizar el correcto manejo del escudo excavador, revisar de forma continua que el avance se apege de

forma precisa a la referencia indicada por el rayo láser, también deberá verificar constantemente que las presiones de empuje no excedan de las establecidas, así como el monitoreo de aceite hidráulico y mantenimiento del propio escudo.

7. **Operador de unidad de potencia y de empuje:** manipula las válvulas que trabajan dentro de la unidad de potencia P-600, para asegurar que las presiones que se transmitan a los gatos telescópicos sean adecuadas, revisará constantemente que no haya fugas de aceite hidráulico y que la unidad trabaje de forma correcta durante todo el turno. Dentro de la lumbrera de empuje controla la presión de empuje que ejercen los gatos telescópicos hacia el sistema de tubería y está en constante comunicación con el operador de escudo para verificar que no se presente inconvenientes en el escudo a medida que se aplica la fuerza de empuje.
8. **Operador de unidad de acarreo:** realiza el movimiento del material excavado desde el lugar donde se encuentra el escudo excavador hasta la lumbrera de extracción, también deberá reportar cualquier anomalía al mecánico en turno para el mantenimiento de dicha unidad.
9. **Operador de unidad de lubricación:** se encarga de la correcta inyección de lodo bentonítico de acuerdo a los volúmenes calculados por el residente de obra, que serán indicados por un tiempo también establecido. Opera el equipo en base a la dosificación estándar de agua como de bentonita.
10. **Operador de grúa:** trabajará de forma correcta la grúa Groove para la descarga de tubería suministrada semanal y los acomodará en los espacios designados, también realizará el retiro de la tolva que contiene el material excavado acercado por el operador de la unidad de rezaga a la lumbrera de empuje y lo depositará a pie de la presa Guadalupe, además de realizar maniobras para bajar y para retirar el escudo de excavación de las lumbreras.
11. **Habilitador de tubos:** sus actividades serán en superficie, pegando cerchas y realizando los barrenos necesarios dentro de los tubos en todos

los tubos que se encuentren disponibles para la colocación de taquetes expansivos y la adaptación de torzales, es decir dejar el tubo completamente preparado para que pueda ser bajado a la lumbrera de empuje.

12. **Maniobrista:** se comunicará mediante movimientos corporales con el operador de grúa con el fin del correcto retiro de la tolva que contiene el material producto de la excavación, desde la lumbrera de empuje hasta el banco de material en superficie.
13. **Ayudantes generales:** estarán transportando que ha rezagado el escudo y que ha sido trasladado por la banda transportadora depositándolo en la tolva de la unidad de acarreo. Por otra parte, estará apoyando al cómodo de las diferentes líneas de alimentación del túnel dentro del túnel cada que se adicione un tubo al túnel.
14. **Soldador:** realizará cualquier adaptación, corrección o adición a cualquiera de los equipos o máquinas que lo requieran, además soldará bases para las picas de excavación del escudo.
15. **Eléctrico:** manipula y verifica el correcto funcionamiento de todos los interruptores de los equipos que requieren suministro de corriente eléctrica, además da el correcto mantenimiento a la línea de comunicación de la línea comunicación entre el operador de empuje y de escudo. También deberá atender cualquier inconveniente o imprevisto eléctrico que presenten los equipos y máquinas de la obra.
16. **Chofer:** traslada al personal desde el punto de acuerdo hasta la obra, también estará transportando materiales, herramientas desde el almacén a la lumbrera de empuje o bien desde otras obras de la compañía, además de recolectar órdenes de compra.
17. **Almacenista:** administra la entrada y salida de materiales y herramientas del almacén, además de realizar inventarios de forma periódica, recepción de materiales entregados por proveedores, también estará dando el visto bueno a las facturas de los gastos que se realicen en la obra.

18. **Mecánico:** revisará que las unidades, equipos y maquinaria de la obra se encuentren en óptimas condiciones de funcionamiento y también atenderá de forma oportuna cualquier falla que reporten los operadores de las mismas para minimizar los tiempos muertos en la operación, además les estará suministrando combustible cada vez que sea necesario. Semanalmente estará llenando correctamente las bitácoras de la maquinaria donde se registra el hodómetro diario al iniciar y finalizar cada turno.

#### **6.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TÚNEL 4.**

Una vez que fueron terminadas por completo las actividades de construcción de la lumbrera de empuje y fueron acondicionados los accesos para el ingreso de unidades a la obra, se procede a dar inicio al proceso de hincado por medio del método Pipe Jacking.

##### **6.4.1 Suministro y habilitado de tubos de concreto.**

Antes de dar inicio a la operación de hincado solicité con una semana de antelación el envío de los primeros tubos de concreto (figura 6.4.1.a), en este caso fueron quince unidades que fueron suficientes para poder arrancar las actividades correspondientes. Al momento de su llegada revisé que sus condiciones físicas fueran óptimas y que se recibiera la cantidad de “tubos lisos” y “tubos para inyección de bentonita” solicitados.



**Figura 6.4.1.a.** Suministro y acomodo de tubería de concreto. Fuente: elaboración propia.

Dichos tubos se descargan de forma cuidadosa y se estiban en máximo dos tubos en áreas cercanas a la lumbrera de empuje.

Posterior, el habilitador de tubos coloca las cerchas de madera a cada uno de los tubos (figura 6.4.1.b) y los torzales de alambre recocado necesarios para el soporte de las líneas de alimentación del túnel, tales como agua, cable 4 ceros, de telecomunicaciones, de inyección de bentonita y de ventilación, además de la colocación de un riel dentro del tubo que se ajustará de forma horizontal y tubo para ventilación de PVC cada que lo requiera el túnel, ya que los tramos de tubo son de 6 m y al ser más largos que el tubo de concreto tienden a tener espacios sobrantes.



**Figura 6.4.1.b.** Habilitado de tubería de concreto en superficie. Fuente: elaboración propia.

Por lo establecido por la gerencia de la compañía, se indicó que la secuencia de tubos en el túnel deberá ser seis “tubos lisos” y el séptimo deberá ser “tubo para inyección de bentonita”, por lo que en superficie se debieron tener apilados los tubos de esta forma y listos para bajarlos cuando la operación lo requiriera.

#### **6.4.2 Alineación y colocación del rayo láser.**

El alineamiento horizontal y vertical se realiza por medio del rayo láser que emite un haz de luz rojo que se proyecta hasta el frente de la excavación dentro del escudo (figura 6.4.2.a) y servirá de referencia para el operador. El láser correctamente calibrado se ubicará en una base especial sobre la placa del muro de reacción de forma que se forme un ángulo de  $90^\circ$  entre la superficie de dicha placa y la base del láser. El láser se alineó y niveló para dar la pendiente requerida sobre la línea de proyecto, en este caso del 1% (figura 6.4.2.b).



**Figura 6.4.2.a.** Proyección de haz de luz del láser en el frente del escudo excavador. Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.4.2.b.** Calibración de láser en base a la pendiente establecida para el túnel. Fuente: elaboración propia.

### **6.4.3 Empotramiento del escudo excavador.**

El operador de grúa realizó las maniobras necesarias para poder bajar el escudo excavador a la lumbrera de extracción, con ayuda de lazos y cables (figura 6.4.3.a) colocados por los ayudantes atados al propio escudo para lograr alinearlos a la corredera de una forma más eficaz.



**Figura 6.4.3.a.** Se empotra escudo en respetando el eje delimitado por el topógrafo. Fuente: elaboración propia.

Una vez que el escudo se encontraba en el punto requerido, se bajó un gato telescópico Granite a la lumbrera también con apoyo de la grúa Grove, el cual fue adaptado y soldado a la placa del muro de reacción y a la parte trasera del escudo excavador (figura 6.4.3.b), se conectó a la unidad de potencia P-600 para ejercer ejercerle un empuje a la tuneladora y empotrarlo al estrato de suelo.



**Figura 6.4.3.b.** Colocación de gato telescópico detrás del escudo excavador. Fuente: elaboración propia.

Al estar en contacto el escudo con el suelo, se realizaron todas las conexiones mecánicas necesarias del escudo y se realizaron las primeras pruebas de funcionamiento tanto de empuje como de excavación, de forma consecuente se realizaron las rotaciones iniciales de la cabeza del escudo para comenzar penetrar el estrato de suelo. Detrás de la banda transportadora del escudo se preparó un contenedor que colectó el primer volumen de suelo excavado, cabe mencionar que por cuestiones de espacio aún no se pudo bajar la tolva con la que se retira el material (figura 6.4.3.c).



**Figura 6.4.3.c.** Acomodo de contenedor para recolectar material que comience a retirar la banda transportadora. Fuente: elaboración propia.

Al encontrarse al menos la mitad del cuerpo del escudo dentro del suelo se procedió a adaptar el yoke detrás del escudo excavador, posterior se bajaron y se adaptaron los dos primeros gatos telescópicos de empuje al yoke y placa de soporte del muro de reacción, para que el operador de empuje pudiera ejercer la presión del hincado de forma correcta y además dar el espacio suficiente para bajar la tolva de retiro de material rezagado o excavado (figura 6.4.3.d).



**Figura 6.4.3.d.** Recolección de material excavado para el llenado de la primera tolva. Fuente: elaboración propia.

#### **6.4.3.1 Los gatos telescópicos de empuje.**

Los gatos telescópicos se dividen en dos secciones: la primera está conformado por el empuje mediante el diámetro menor de dichos gatos, los cuales tienen una longitud máxima de 1.50 m y un diámetro de 10" llamados "gatos chicos" para fines prácticos del proceso de hincado y son los primeros en ejercer presión al sistema, mientras que la segunda sección de los gatos tienen una longitud máxima de 1.40m y un diámetro de 12" llamados "gatos grandes" que salen de forma automática cuando alcanzan su longitud máxima los "gatos chicos".

Por conceptos fundamentales de Física, la presión estará en función del diámetro de aplicación, por lo que las presiones en los gatos chicos fueron menores, oscilando desde 400 hasta los 2600 PSI, mientras que en los gatos grandes las presiones fueron mayores, permaneciendo en un rango de entre 3000 y 5000 PSI durante todo el proceso de hincado. Es importante mencionar que las presiones fueron variando en relación al avance del hincado debido a que el peso del sistema aumentaba conforme se adicionaba un nuevo tubo de concreto a la línea.

#### **6.4.3.2 Diario de control de aplicación de recursos de obra y obtención de resultados.**

Bajar un nuevo tubo la lumbrera significaba que se tuvieron que retirar 5 tolvas de material excavado, cada una con una capacidad de 2.30 m<sup>3</sup> con un avance teórico de 56 cm. Cabe recalcar que dichas tolvas poseen características particulares en relación a las demás, las cuales son: número de tubo que se está hincando, sus presiones iniciales y finales, temperatura del aceite hidráulico del tanque de almacenamiento del escudo excavador, hora de inicio del ciclo de empuje y termino por tolva, número de tubo que se estaba hincando, así como observaciones que reportaba el operador de empuje que pudieran intervenir en el proceso afectando el tiempo de retiro de material, ya sea por alguna falla mecánica o bien por fallas eléctricas, entre otras.

Dichos datos eran vaciados en un formato general de hincado llamado “ Diario del control de aplicación de recursos de obra y obtención de resultados” (figura 6.4.3.2.a), el cual era entregado por el residente de obra en turno a su operador de empuje al inicio de cada turno y al retiro de cada tolva mi función también como residente era verificar los datos principales, monitorear que no hubiera anomalías tanto en la presión del hincado como de la temperatura del aceite hidráulico, revisar que no se presentaran retrasos en la operación, además de enviar un reporte por medio de una aplicación de mensajes digital, cada que terminara el ciclo de una tolva, enviando una foto del material que se extraía así como las características específicas del proceso.

El formato era llenado por cada tubo que se hincara en el turno y era recabado por el residente al fin de cada jornada laboral, para después ser integrado a la carpeta de estos reportes. La carpeta de los reportes diarios era entregada al final de la obra a la gerencia de la empresa.



#### 6.4.4 Instalación de las líneas fundamentales del túnel.

Al encontrarse el escudo excavador empotrado en casi la totalidad de su cuerpo, se bajó el primer tubo de concreto a la lumbrera de empuje, por lo que fue necesaria la oportuna adaptación de las líneas de alimentación del túnel, es importante recordar que las líneas son sostenidas dentro del túnel por medio de los torzales de alambre recocido que antes ya fueron habilitados en superficie (figura 6.4.4.a).

Existen ocho líneas dentro del túnel que son elementales para el proceso de hincado, todas se instalarán en el túnel a partir del segundo tubo a excepción de la línea de comunicación y la línea de inyección de bentonita. A continuación, se describe la función de cada una de ellas:

- A) *Línea de agua a presión:* se transporta desde el tanque de almacenamiento de agua en superficie hasta la entrada del túnel por medio de manguera de 2" con el apoyo de una bomba hidráulica de 1 HP, su función es llegar al escudo y reducir la temperatura que se genera por la constante operación de esta máquina. Dentro del túnel está línea conformada por tubo galvanizado de 2".
- B) *Línea de agua en retorno:* una vez que el agua logró llegar al escudo excavador y logró equilibrar la temperatura interior, es necesario recircular ese líquido nuevamente hacia el tanque de almacenamiento. Es importante mencionar que el ciclo de intercambio de calor, tanto en la línea de presión como de retorno no se debe detener mientras el escudo está en operación. También se encuentra conformada por tubo galvanizado de 2" dentro del túnel y en el recorrido desde la entrada del túnel hacia el tanque de almacenamiento, su material es manguera de 2" de plástico reforzado.
- C) *Línea de ventilación:* trata de mantener un ambiente fresco dentro del túnel para los trabajadores, ya que se genera una gran cantidad de polvo cuando el escudo se encuentra excavando, además de circular el aire para que este pueda salir por la entrada principal del túnel. Recorre todo el túnel mediante tubo de PVC de 6" en tramos de 6m y unidos con coples del mismo material, hasta llegar a la entrada del escudo excavador.

- D) *Línea de inyección de bentonita*: transporta el lodo bentónico desde la unidad de inyección hasta las distintas salidas de lubricación que tiene el túnel, recordando que estarán a cada séptimo tubo del túnel, su función será reducir las presiones ejercidas por el sistema de empuje y por la fricción propia del suelo con el sistema de tubería. Está conformado por los mismos materiales que las líneas de agua. La tubería se habilita a partir del tubo número siete del túnel.
- E) *Línea de comunicación*: esta será la primera línea en instalarse al iniciar los trabajos de hincado, incluso desde el momento en que se empotra el escudo, ya que es de vital importancia que tanto el operador de escudo como el de empuje estén en constante comunicación para reportar cualquier incidente, además para controlar las presiones que vaya solicitando el escudo o bien para frenar en caso de que se presente algún inconveniente en la operación del hincado. Esta línea estará habilitada con cable 25 AWG desde los audífonos con micrófono que utiliza el operador de empuje en la lumbrera de empuje, hasta los audífonos que utiliza el operador de escudo al inicio de la excavación.
- F) *Línea de corriente eléctrica*: conformada con cable 4 ceros, su finalidad es llevar la energía eléctrica suficiente desde el generador CAT XQ400 hasta la adaptación del escudo en el punto donde se encuentre situado.
- G) *Línea de tránsito de la unidad de rezaga*: permite el correcto movimiento de la unidad de acarreo y su tolva desde el lugar donde se encuentre operando el escudo trasladando el material que se ha retirado hasta la lumbrera de empuje, donde el material será retirado por la grúa Groove y dispuesto en superficie. Está compuesto por rieles de acero, uno por tubo dentro del túnel y están unidos por medio de tornillos de 7" y tuercas mariposas.
- H) *Línea de iluminación*: estará proveyendo de luz todo el recorrido del túnel para facilitar el movimiento de la unidad de acarreo y disminuyendo los riesgos que pudieran presentarse. Estará conformada de focos de 100 W a cada 4m y cable calibre 8 de uso rudo, saliendo desde el generador de energía eléctrica CAT XQ 400 hasta el final del túnel.



**Figura 6.4.4.a.** Localización de las ocho líneas elementales en el túnel. Fuente: elaboración propia.

#### **6.4.5 Retiro y acarreo de material excavado.**

Como se indicó anteriormente, para poder bajar un nuevo tubo a la lumbrera es necesario el retiro de 5 tolvas de material excavado que será igual al volumen que estará ocupando el tubo a empotrar.

El acarreo de dicho material estará determinado por una sola ruta que recorrerá la unidad de rezaga la cual está determinada desde el primer punto que es la banda transportadora dentro del escudo excavador y el segundo punto será la lumbrera de empuje, donde se realizarán las maniobras necesarias para el retiro de la tolva con el suelo rezagado (figura 6.4.5.a), dicho material será vaciado y dispuesto en superficie. Después de que la tolva se encuentra liberada se baja nuevamente a la lumbrera de empuje y adaptada nuevamente a la unidad de acarreo que regresa a la banda transportadora para retomar el nuevo ciclo de la siguiente tolva.



**Figura 6.4.5.a.** La tolva de material rezagado producto de la excavación se encuentra lista en la lumbrera de empuje para ser retirada por la grúa Groove. Fuente: elaboración propia.

Es importante recalcar que el tiempo de acarreo estará en función de la longitud que tenga el túnel en ese momento, es decir, de la cantidad de tubos que ya se encuentren en el sistema. Por ejemplo: si el túnel contara con 100 tubos, la distancia que recorrería la unidad de rezaga sería de 250 m lineales tan solo para llevar el material a la lumbrera de salida y además los 250 m lineales del traslado de regreso, entre mis tareas como residente del túnel radica monitorear el tiempo de acarreo y del ciclo de excavación para poder obtener un rendimiento diario. El cual será un dato importante para la requerir oportunamente la correcta cantidad de concreto semanalmente.

#### **6.4.6 Bajada de un nuevo tubo a la lumbrera de empuje.**

Cuando los gatos ya se han extendido al menos hasta 2.75 m, considerando la longitud máxima de los “gatos chicos” y 1.25 m de los “gatos grandes”, se dice que la lumbrera de empuje se encuentra disponible para la bajada y adaptación de un nuevo tubo.

Los pasos indispensables para poder colocar un nuevo tubo a la línea del túnel son:

- i. Desconexión de líneas del túnel: una vez que se los gatos telescópicos se han abierto lo suficiente para recibir un nuevo tubo, se deberán retirar cuidadosamente las ocho líneas del túnel, posicionando los interruptores de corriente eléctrica en modo apagado, tales como el cable 4 ceros, línea de agua, y de ventilación. En el caso de los rieles retirar la tuerca mariposa de su tornillo y quitar el primer riel. (figura 6.4.6.a).



**Figura 6.4.6.a.** Desconexión de líneas principales del escudo. Fuente: elaboración propia.

- ii. Retracción de yoke y de gatos telescópicos de empuje: al terminar de desconectar adecuadamente cada una de las ocho líneas, el operador manipula la unidad de potencia P-600 para poder retraer los gatos telescópicos hasta su punto de arranque de empuje inicial, es decir “gatos

chicos” hasta que tengan una extensión de cero metros, es importante aclarar que los gatos telescópicos están adaptados fijamente al yoke, por lo que, al retraer esta longitud de los gatos, el yoke estará retrocediendo en conjunto con los gatos (figura 6.4.6.b).



**Figura 6.4.6.b.** Retracción inicial de yoke y gatos telescópicos. Fuente: elaboración propia.

- iii. Maniobras necesarias para movimiento de nuevo tubo de concreto: al estar completamente retraído el yoke y gatos, se prepara y se engancha el próximo tubo en superficie para ser bajado con apoyo de la grúa hasta la lumbrera de empuje (figura 6.4.6.c).

El maniobrista juega un papel importante en superficie ya que su lenguaje de comunicación hacia el operador de grúa es únicamente corporal, por lo que las indicaciones que se transmitan deberán de ser precisas para disminuir los riesgos para los trabajadores que se encuentran dentro de la lumbrera.

Es importante que el residente de obra en turno verifique que los tubos se están bajando conforme a la regla establecida, donde se indica que se colocarán seis “tubos lisos” y el séptimo será “tubo para inyección de bentonita”.



**Figura 6.4.6.c.** Bajada de nuevo tubo a la lumbrera de empuje. Fuente: elaboración propia.

Al momento de colocar un nuevo tubo en el túnel, una de mis labores como residente era notificar al superintendente, indicando que no hubiera ningún contratiempo o accidente.

- iv. Acomodo del nuevo tubo al sistema del túnel: al encontrarse el tubo aún enganchado a la grúa, en un punto cercano del espacio que hay entre el yoke y el último tubo al que se le aplicó la fuerza de empuje, se acomoda de forma manual con apoyo de los trabajadores que se encuentran la lumbrera y es el maniobrista en superficie quien realizará los movimientos de comunicación con el operador de la grúa para que el tubo se embone totalmente (figura 6.4.6.d).

Al estar el tubo nuevo posicionado y alineado respecto al tubo anterior, el operador de empuje comienza a aplicar nuevamente presión con los “gatos chicos” que se transmiten nuevamente al yoke y este último

trasmitir dicha presión de forma uniforme al tubo que recientemente se colocó.

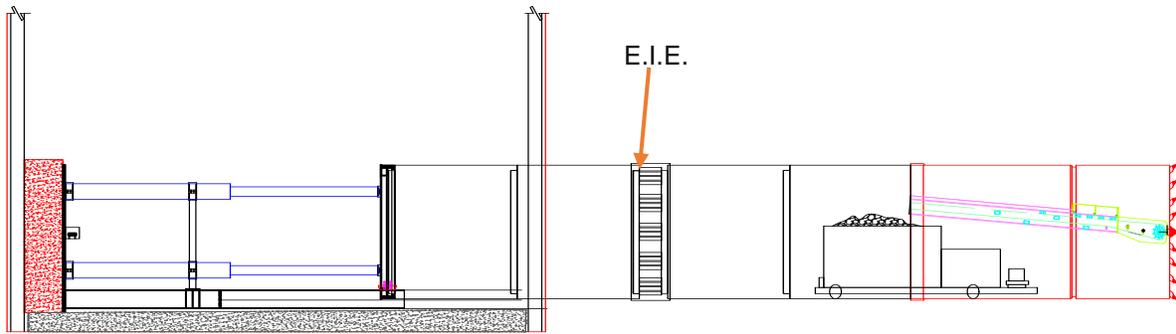


**Figura 6.4.6.d.** Adaptación de nuevo tubo de concreto al sistema actual. Fuente: elaboración propia.

- v. Conexión de líneas principales del túnel: al verificar que el nuevo tubo se encuentra embonado en su totalidad, se conectan todas las líneas actuales del túnel y se reanudan las actividades del hincado con normalidad.

#### **6.4.7 Colocación de Estaciones Intermedias de Empuje.**

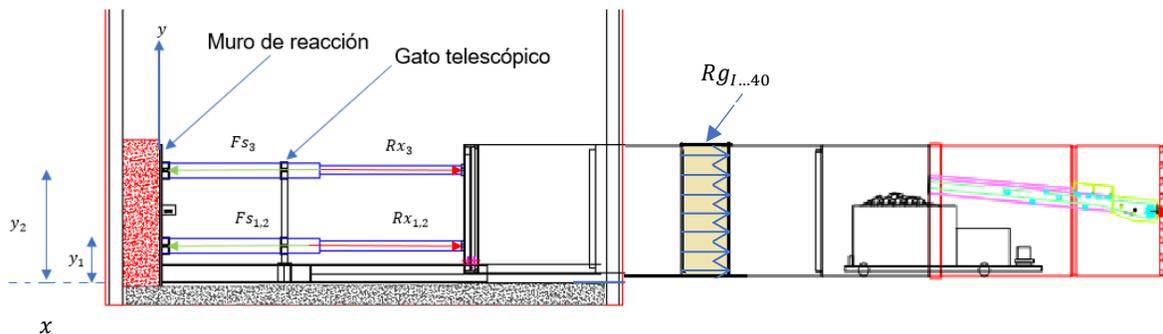
Mediante el cálculo que involucra las fuerzas que actuarán durante el hincado de tubería se determina la colocación de estaciones intermedias de empuje (E.I.E) que servirán para mantener la fuerza de empuje necesaria cuando se incrementa la longitud de la tubería hincada y el frente de excavación del escudo se aleja del sistema de empuje principal (figura 6.4.7.a).



**Figura 6.4.7.a.** Perfil esquemático de una E.I.E. dentro de un túnel hincado por el método Pipe Jacking. Fuente: elaboración propia.

Dichas Estaciones Intermedias de Empuje (E.I.E) son adaptadas en el perímetro de determinado tubo. En el proyecto del túnel 4, se consideró instalar dos E.I.E. la primera fue colocada en el quinto tubo y la segunda en el tubo cuarenta y seis. En cada una de esas estaciones se colocaron 8 secciones, con cinco gatos hidráulicos cada una.

A continuación, se presenta un diagrama del comportamiento de las fuerzas en una E.I.E.



Donde:

$F_s$  = Fuerza producida por el sistema hidráulico en operación,

los subíndices indican el número de gato hidráulico.

$R_x$  = fuerza de reacción generada por el muro, los subíndices indican el número de gato hidráulico.

$y_{1,2}$  = indica la altura medida desde el suelo hasta el centro del embolo del gato telescópico,

$R_{g_{1...40}}$  = fuerzas transmitidas por los gatos en la Estación Intermedia de

*Empuje hacia el sistema de tubería, en este caso desde el gato 1 hasta el 40.*

Para fines prácticos, se proponen los siguientes datos:

Considerando que el sistema está operando con solo tres gatos telescópicos y cada uno tiene una reacción ( $Rx$ ) de 10 T, decimos que:

$$Rx_1 = Rx_2 = Rx_3 = 10.0 T$$

Si realizamos la suma de las tres reacciones obtendremos:

$$Rx_{TOTAL} = 30 T$$

Si se desea saber cuánta fuerza estará ejerciendo cada uno de los gatos en las secciones de la Estación Intermedia de Empuje, simplemente dividimos la suma de las reacciones ejercidas directamente por los gatos telescópicos en la lumbrera hacia la tubería, entre el número de gatos en la E.I.E.

En este caso, recordemos que se trabajó con 40 gatos en la Estación Intermedia, lo que resulta:

$$Rg_{1...40} = \frac{Rx_{TOTAL}}{\# \text{ de gatos en E. I. E.}}$$
$$Rg_{1...40} = \frac{30 T}{40 \text{ gatos}} = 0.75 T / \text{gato}$$

De lo anterior podemos observar que, de las fuerzas por reacción debida a los gatos telescópicos de 30 T, aplicadas en solo tres puntos del sistema; la E.I.E. nos ayuda, en este caso, a distribuir la fuerza en 40 puntos del sistema de tubería en solo 0.75 T cada una.

Las E.I.E. fueron habilitadas en superficie por el soldador (figura 6.4.7.b) y supervisado por el residente de obra quien solicita el aceite hidráulico suficiente para estaciones.



**Figura 6.4.7.b.** Preparación de E.I.E. en superficie. Fuente: elaboración propia.

#### **6.4.8 Inyección de lodo bentonítico.**

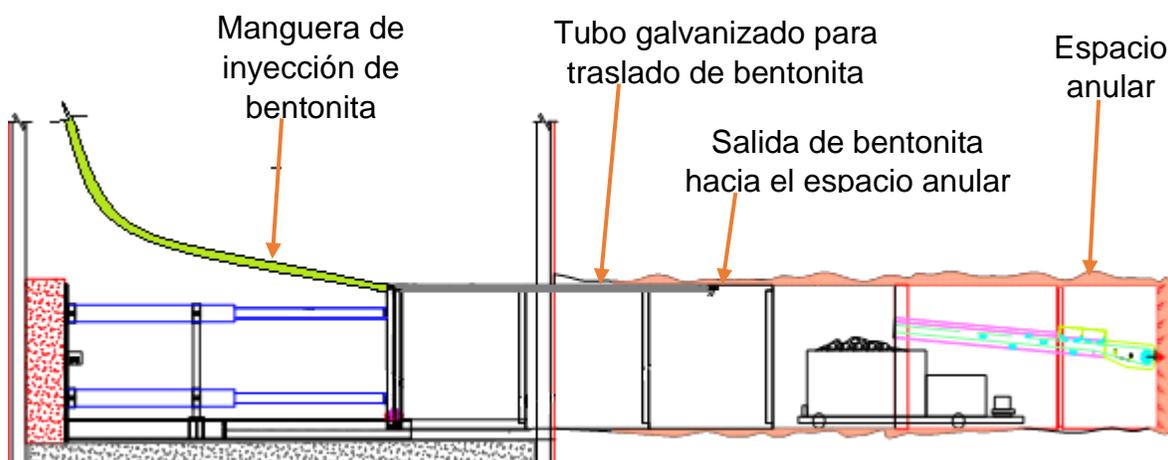
La lubricación del túnel es una actividad necesaria para reducir la fricción entre el suelo en contacto y el sistema de tubería cuando los gatos telescópicos o de empuje están en operación. Esto será posible gracias al suministro de lodo bentonítico.

Es importante mencionar que el lodo bentonítico es una mezcla preparada en la unidad de inyección de bentonita la cual está operando en superficie y cuenta con un contenedor con una capacidad de almacenamiento de 800 L, que bombea la mezcla desde una manguera que tiene este equipo en superficie, hasta la entrada del túnel donde cambia de material por una línea de tubo galvanizado de 2" y a su vez estos tendrán una salida que conectará al espacio anular (figura 6.4.8.a). Recordemos que la salida de bentonita hacia el espacio anular dentro del túnel se encuentra a cada siete tubos.



**Figura 6.4.8.a.** Salida del lodo bentonítico hacia el espacio anular .Fuente: elaboración propia.

El espacio anular es el volumen formado por la excavación que se genera entre la excavación superior de las picas del escudo y su diámetro exterior (sobrecorte de picas) por la longitud que lleve de avance el túnel en determinado momento. (figura 6.4.8.b).



**Figura 6.4.8.b.** Perfil esquemático de la lubricación del túnel por inyección de lodo bentonítico.

Fuente: elaboración propia.

La dosificación del lodo bentonítico será la siguiente:

$$1 \text{ contenedor de } 800 \text{ L de agua} + \frac{1}{2} \text{ saco de bentonita de } 50\text{kg}.$$

La mezcla deberá estar perfectamente disuelta, es decir, sin presencia de grumos, para ello el residente de hincado debe supervisar que la mezcla sea preparada correctamente y en la cantidad calculada la cual será indicada al operador de la unidad de inyección de bentonita (figura 6.4.8.c).



**Figura 6.4.8.c.** Preparación y dosificación de lodo bentonítico. Fuente: elaboración propia.

El volumen de lodo bentonítico que se inyectará estará en función del avance que se presente y por tanto de las presiones que se vayan ejerciendo. Entre mis funciones como residente de hincado era monitorear dichas presiones y estar en

contacto con el operador de empuje para determinar el momento en que se requiriera la lubricación.

La cantidad a inyectar estaba en función del avance en metros lineales que llevara el túnel, y del espacio de sobrecorte que generaban las picas perimetrales del escudo, debido a que sólo se inyectaba el 3% de lodo bentonítico en función del espacio anular en longitud avanzada. El sobrecorte del túnel fue constante durante todo el túnel, siendo en promedio de 3" con respecto a la parte más alta del escudo excavador.

Como residente de hincado coordiné con el chofer de la obra y con dos ayudantes generales la recolección de los sacos de bentonita para poder trasladarlos en la unidad de la obra desde el almacén del proveedor en el municipio de Cuautitlán hasta la obra en Cuautitlán Izcalli y verificar diariamente el número de tubo que se estaba hincado para que en base a ello pudiera calcular el volumen de inyección de bentonita.

Por ejemplo, si se trabajaba en el hincado del tubo número 100. Los datos para calcular el volumen serían los siguientes:

$$D \text{ (diámetro más sobrecorte)} = 88" + 3" = 91" = 231.14 \text{ cm} = 2.31 \text{ m}$$

$$d \text{ (diámetro del exterior del escudo excavador)} = 88" = 223.52 \text{ cm} = 2.24 \text{ m}$$

$$l \text{ (longitud actual del túnel)} = (\text{longitud por unidad de tubo})(\text{cantidad de tubos})$$

$$l = (2.50 \text{ m})(100) = 250 \text{ m}$$

Recordando que la inyección de lodo bentonítico está en función del espacio anular actual, será necesario calcular el volumen en relación al sobrecorte hasta los 250 m de avance, de acuerdo al ejemplo.

Para obtener el volumen, es necesario obtener el área efectiva de sobrecorte, haciendo una diferencia de áreas entre los diámetros "D" y "d" y después multiplicar dicha área efectiva (A) por la longitud actual.

$$A = \frac{(\pi D^2)}{4} - \frac{(\pi d^2)}{4} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} [(2.31 \text{ m})^2 - (2.24 \text{ m})^2] = 0.250 \text{ m}^2$$

$$V = (A)(l) = (0.250 \text{ m}^2)(250 \text{ m}) = 62.5 \text{ m}^3 = 62,500 \text{ L}$$

Retomando que sólo se inyecta un 3% de ese volumen, el suministro final (Sf) de lodo bentonítico para el ejemplo sería el siguiente:

$$Sf = (0.03)(62,500 \text{ L}) = 1,875 \text{ L} = 2.35 \text{ tolvas de } 800 \text{ L}$$

#### **6.4.9 Salida del escudo excavador.**

Una vez que se ha instalado la totalidad de los tubos del tramo, el escudo se extraerá en la lumbrera de salida que se construye para este fin. Previo a esto se hacen los trabajos necesarios como lo son: ubicación de eje de salida por medio de topografía, movimiento de maquinaria a la lumbrera de salida para comenzar a perfilar dicha lumbrera.

Para este túnel en particular no fue posible construir una lumbrera de extracción, debido a que las condiciones topográficas y de acceso no eran adecuadas, por lo que se optó por únicamente preparar la superficie dejándola libre de cualquier obstáculo que interrumpiera la salida del escudo excavador y de la tubería.

Sin embargo, aparecieron dos rocas de un diámetro considerable en la línea exacta donde se situaría el escudo, por lo que tuvieron que ser retiradas con la excavadora (figura 6.4.9.a) y el espacio que dejaron dichas rocas fue rellenada y compactado con el bote de esa misma máquina.



**Figura 6.4.9.a.** Retiro de rocas de gran diámetro por excavadora .Fuente: elaboración propia.

Al encontrarse el cuerpo del escudo completamente en el exterior, se programó el envío de una plataforma para el retiro del escudo excavador, el cual fue transportado al taller de mantenimiento de la empresa donde se revisó y se preparó de forma oportuna para el siguiente hincado.

Para poder retirar el escudo excavador fue necesario trasladar la grúa Groove desde la lumbrera de empuje hasta la lumbrera de extracción y una vez que llegó la plataforma, se realizaron las maniobras necesarias para poderlo colocar sobre esa unidad (figura 6.4.9.b y 6.4.9.c).



**Figura 6.4.9.b.** Retiro de escudo excavador del túnel. Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.4.9.c.** Maniobras para colocación de escudo en la plataforma. Fuente: elaboración propia.

Las maniobras para el movimiento fueron complicadas, debido a que el acceso de salida tiene una pendiente muy pronunciada, lo que dificultó el movimiento de la plataforma.

Una vez retirado el escudo excavador, se dejaron preparados dos tubos en la lumbrera de extracción los cuales se estarán conectando al túnel 3 del colector sur del proyecto maestro (figura 6.4.9.d).



**Figura 6.4.9.d.** Preparación de tubos para conexión de túnel 3. Fuente: elaboración propia.

#### **6.4.10 Desmantelamiento, limpieza y retiro de equipos en el túnel 4 y su lumbrera de empuje.**

##### **6.4.10.1 Desmantelamiento y limpieza del túnel 4.**

Una vez que se ha retirado el escudo, deberán desmantelarse por completo las líneas indispensables del túnel, a excepción de la línea de iluminación y de tránsito de la unidad de rezaga que se seguirá empleando para movimiento del personal dentro del túnel (figura 6.4.10.a).



**Figura 6.4.10.a.** Desmantelamiento de líneas del túnel. Fuente: elaboración propia.

Después de haber retirado las líneas estas fueron transportadas hasta la lumbrera de empuje, donde posteriormente fueron extraídas por la grúa y acomodadas en superficie.

Una vez que las primeras líneas fueron retiradas en su totalidad del túnel, se desmanteló la línea de tránsito de la unidad de acarreo y se realizó una limpieza general del túnel de forma manual. Finalmente desmanteló la línea de iluminación del túnel.

#### 6.4.10.2 Desmantelamiento y limpieza de la lumbrera de empuje.

Una vez que el túnel se encuentra completamente limpio, se deben retirar los equipos instalados en la lumbrera de empuje. Tales como: corredera, yoke, troqueles, gatos telescópicos de empuje, placa del muro de reacción, tablestaca y mangueras de los equipos que estaban instalados en superficie (figura 6.4.10.b y 6.4.10.c).



**Figura 6.4.10.b.** Desmantelamiento de lumbrera de empuje. Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.4.10.c.** Desmantelamiento de lumbreira de empuje. Fuente: elaboración propia.

Para poder retirar la corredera fue necesario retirar dos tubos que quedaron sobre ella, así como retirar la soldadura de los troqueles para poder maniobrar libremente (figura 6.4.10.d y 6.4.10.e).

Una vez retirada la corredera, se rellenó el espacio de la corredera con parte del material que se excavó en el proceso de hincado para respetar el nivel anterior y posterior se bajaron nuevamente ambos tubos donde estuvo colocada la corredera.

Una vez que se terminó de desmantelar la lumbreira por completo se demolió el concreto armado de muro de reacción y el escombros se dispuso en superficie.



**Figura 6.4.10.d.** Retiro de tubería sobre la corredera. Fuente: elaboración propia.



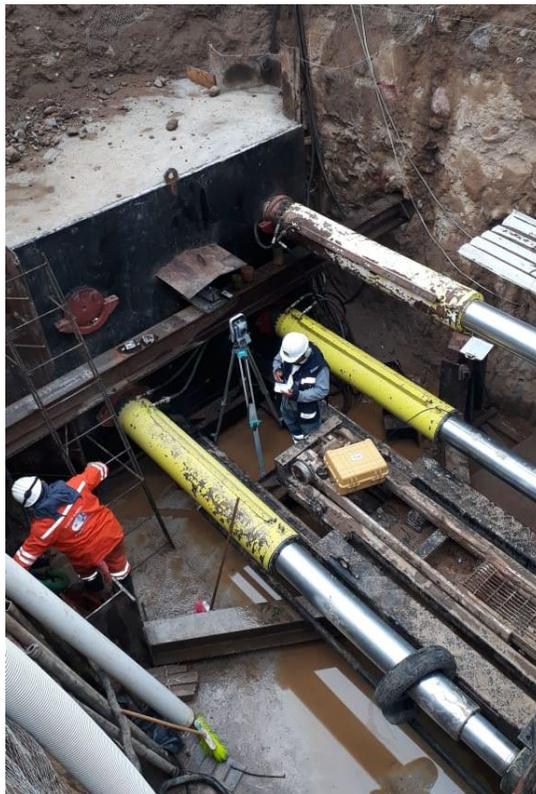
**Figura 6.4.10.e.** Retiro de corredera. Fuente: elaboración propia.

## 6.5 INSPECCIONES FUNDAMENTALES EN EL PROYECTO DEL TUNEL 4.

A fin de llevar un control del avance general de la obra se tuvieron que realizar inspecciones periódicas para evaluar que la calidad del proyecto fuera óptima a fin de evitar errores que pudieran poner en riesgo la ejecución del hincado del túnel.

### 6.5.1 Revisión topográfica.

De forma diaria el topógrafo de la obra tenía que realizar levantamientos del avance que presentaba el túnel en ese momento, revisando datos importantes del escudo excavador tales como pendiente, alineación, ubicación, entre otros. La información recabada era vaciada en un formato especial para uso del topógrafo y del residente (figura 6.5.1.a). Cabe mencionar que estos levantamientos son indispensables para detectar desvíos en el túnel y que la salida del escudo no sea en lo establecido por la Comisión del Agua del Estado de México, además con los levantamientos se reduce el margen de error en el eje general del proyecto (figura 6.5.1.b).



**Figura 6.5.1.a.** Levantamiento topográfico del avance del túnel. Fuente: elaboración propia.

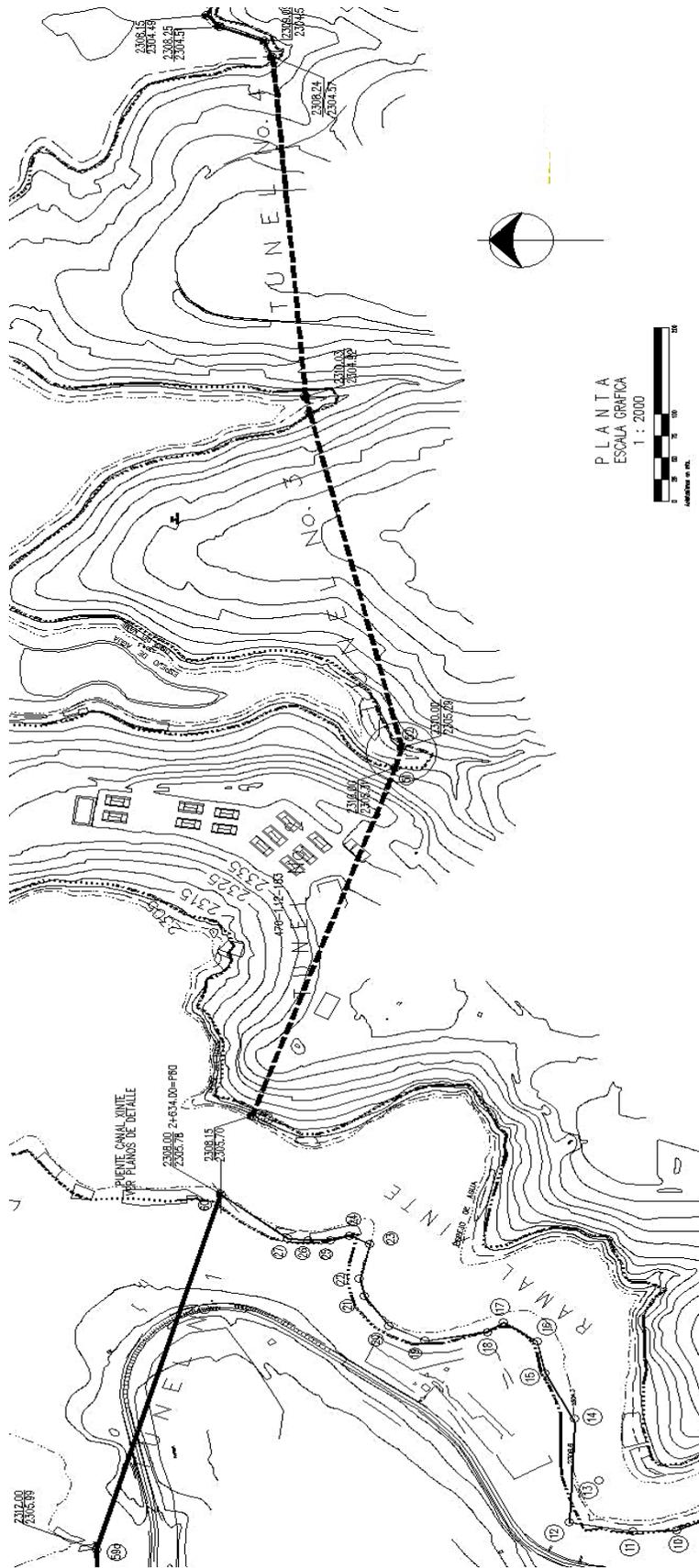


Los levantamientos se realizaron desde el inicio de la obra hasta el retiro del escudo (figura 6.5.1.c), de los cuales se obtuvo información vital para conocer el trazo del túnel en el programa AutoCAD en su extensión de CivilCAD, tanto en superficie como en los perfiles donde el túnel se encontraba en determinado momento, obteniendo una distancia final de 389.11 m y una profundidad máxima de hasta 34.87 m medida desde la parte más alta de la loma donde pasa el túnel hasta el punto más alto del tubo en contacto.



**Figura 6.5.1.c.** Levantamiento final del túnel 4. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta un plano del proyecto ejecutivo de la obra, en el cual se puede apreciar la posición de la tubería en los túneles 1,2,3 y 4, con respecto al nivel del mar, así como su pendiente a lo largo del tramo del colector sur.



Referencias geográficas de los diferentes túneles. Fuente: elaboración propia.

### 6.5.2 Revisión preventiva.

Como residente de obra, cada turno era necesario realizar un recorrido en el túnel para monitorear posibles fracturas en los tubos, que pudieran representar un riesgo. En caso de encontrar alguna anomalía se debía notificar de inmediato al superintendente para poder tomar una decisión.

Durante el proceso de hincado no se encontraron daños mayores, a excepción de algunos tubos que mostraban desprendimientos menores (figura 6.5.2.a), por lo que no hubo alguna situación de peligro que suspendiera la operación.



**Figura 6.5.2.a.** Daño observado en un tubo durante una inspección del túnel 4. Fuente: elaboración propia.

También era necesario que al finalizar el cada turno el residente de hincado revisara las condiciones de las picas, para prever desgastes y realizar los cambios oportunos, así como verificar las condiciones del frente de excavación (figura 6.5.2.b), el cual es la apariencia del material que se puede apreciar dentro de los brazos del escudo, para advertir sobre la presencia de roca que pudiera afectar el rendimiento de la excavación y además dañar las picas.



**Figura 6.5.2.b.** Frente de excavación observado desde el escudo excavador. Fuente: elaboración propia.

En cada una de las inspecciones también era de gran importancia monitorear el estado del sobrecorte, ya que es ese espacio en el túnel que permite la lubricación perimetral exterior del túnel, por otra parte, el suelo que se excavó durante todo el túnel mostró una excelente estabilidad, lo que significa que al tener un buen sobrecorte no habrá presión del suelo sobre el túnel y por tanto las presiones del sistema de empuje no se verán alteradas.

## **6.6 Contratiempos y complejidades durante la ejecución del túnel 4.**

### **6.6.1 Lluvia.**

En el proceso de hincado del túnel 4 nos enfrentamos a ciertas adversidades, la primera de ellas fue la lluvia constante, que desde la construcción de la lumbrera afectó el rendimiento de los trabajadores y durante el proceso de hincado presentamos continuas inundaciones en la lumbrera de empuje por lo que se tenía que estar operando de forma consecuyente la bomba sumergible. Además, los riesgos de trabajar en una superficie mojada eran mayores pues los trabajadores de la obra podían sufrir algún accidente durante las maniobras para retiros de tolvas o bien para poder salir de la lumbrera.

Por otro lado, si la lluvia tenía un gran periodo de duración, el acceso para la unidad del personal podría representar un riesgo al resbalar en las pendientes más pronunciadas y además podría quedar atascada pese a las adecuaciones realizadas al inicio de la obra; por lo que teníamos que salir a pie desde la lumbrera de empuje hasta el almacén.

### **6.6.2 Rocas en el frente de excavación.**

La aparición de rocas de diversos diámetros durante el proceso de hincado fue constante, sobre todo entre el hincado de los tubos 56 y 83 (figura 6.6.2.a), que afectó el rendimiento por turno al desgastar de forma considerable las picas, incluso al grado de cortarlas, reduciendo en algunos casos el rendimiento hasta cero tubos hincados durante dos semanas.

Primero era necesario evaluar el tamaño y la ubicación de la roca para determinar la forma en que se atacaría. Los casos más comunes fueron:

- a) Roca de entre 40 y 70 cm de diámetro envuelta por una matriz de suelo: podrían localizarse en cualquier parte del frente de excavación, primero se debía liberar toda la superficie de la roca, retirando la matriz de suelo con un taladro Hilti T1000 (figura 6.6.2.b). Si la roca tenía un diámetro máximo de 50 cm podrá ser retirada por la separación que había entre cada uno de los

brazos del escudo excavador, de lo contrario debía ser seccionada o devastada para poderla retirar.



**Figura 6.6.2.a.** Liberación de rocas con taladro Hilti. Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.6.2.b.** Retiro de roca y reporte de diámetro. Fuente: elaboración propia.

b) Roca de entre 1.20 m y 1.60 m: para su retiro propuse la inyección de cemento expansivo, el cual se prepara con una bolsa de dicho cemento y dos litros de agua perfectamente disueltos.

Para poderlo aplicar fue necesario liberar la superficie de la roca del suelo envolvente y después realizarle una serie de barrenos de 1 ½” en su superficie (figura 6.6.2.c).

Posterior se aplicó la mezcla del cemento expansivo sobre los barrenos y se dejaba reposar entre 3 y 4 horas, para observar la fractura de la roca y poder retirarla (figura 6.6.2.d y figura 6.6.2.e).



**Figura 6.6.2.c.** Barrenos en roca por medio de Roto martillo Hilti. Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.6.2.d.** Aplicación de cemento expansivo. Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.6.2.e.** Roca fragmentada producto de la reacción del cemento expansivo. Fuente: elaboración propia.

- c) Roca de 1.60 m de diámetro o más (figura 6.6.2.f): al encontrarnos con roca de este diámetro se decidió continuar el hincado hasta desgastarla por completo, pero con muy poca presión de los gatos telescópicos, para evitar un daño drástico en las picas



**Figura 6.6.2.f.** Roca de 1.62 m de diámetro en el frente de excavación. Elaboración: propia.

Si las picas presentaban algún daño (figura 6.6.2.g), era necesario realizar el cambio de inmediato para evitar que el sobrecorte del túnel se viera afectado y como residente de hincado reportar al superintendente, además de solicitar de forma oportuna una requisición de picas para evitar retrasos en el hincado. Sin embargo, el cambio de picas implicaba tomar al menos un turno para poder continuar con la operación.



**Figura 6.6.2.g.** Cambio de picas deterioradas. Fuente: elaboración propia.

## **6.6.1 Fallas mecánicas y trabajos necesarios.**

### **6.6.1.1 Sobrecalentamiento del escudo excavador.**

Al operar un sistema de hincado sin detener, es decir trabajando las 24 horas del día, durante los 7 días de la semana, era común que el escudo excavador se sobrecalentara, logrando alcanzar temperaturas sobre los 45° C, así que se debió esperar al menos 30 minutos para que su temperatura se redujera cerca de 3° C para poder continuar con el hincado.

### **6.6.1.2 Cambio periódico del aceite hidráulico del escudo excavador.**

Un contratiempo común en la excavación era el cambio del aceite hidráulico del escudo, el cual se debía cambiar debido a que con el constante movimiento por operación de la máquina se generaban rebabas, ocasionando que el aceite no tuviera la misma efectividad que cuando era recién suministrado. Por esta razón debía ser cambiado completamente al menos 1 vez cada 45 días (figura 6.6.1.2a), ocasionando retrasos de al menos 6 horas.



**Figura 6.6.1.2a.** Cambio de aceite hidráulico del escudo excavador. Fuente: elaboración propia.

### 6.6.1.3 Cambio de llanta de la grúa Groove.

Los operadores de maquinaria tienen como responsabilidad monitorear de forma rutinaria cada una de sus unidades, reportando al residente de obra alguna anomalía. En el caso del túnel 4, la grúa presentó pérdida de aire en una de sus llantas, por lo que tuvo que realizar la búsqueda de una vulcanizadora aledaña a la obra para que pudieran valorarla. Primero se intentó suministrarle aire (figura 6.6.1.3a) pero se determinó que esa no era la falla, al final el diagnóstico fue que la llanta estaba ponchada por lo que tuvo que ser retirada de la grúa y llevada a su taller para poderla reparar y fue entregada en la obra un día después a la obra, afectando por completo la operación del hincado del túnel y por ende el rendimiento diario y semanal.



**Figura 6.6.1.3a.** Revisión de la llanta de la grúa Groove. Fuente: elaboración propia.

## 7. CONCLUSIÓN.

Haber formado parte de una obra de gran importancia para el Estado de México es una experiencia que me ha hecho madurar en muchos aspectos, y sobre todo sentir una satisfacción personal, al conocer este sistema de hincado el cual me ayudó a comprender y poner en práctica una gran parte de los conocimientos adquiridos en diversas áreas de mi preparación como Ingeniero Civil, para un fin en específico: el beneficio del municipio donde he residido la mayor parte de mi vida.

Este proyecto me hizo crear conciencia sobre el gran beneficio que traerá la construcción de ambos colectores para el ecosistema del Santuario de la Presa Guadalupe y sobre todo del gran papel que juega la obra en la calidad de vida de las próximas generaciones y de quienes habitan actualmente en los municipios de Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza, Nicolás Romero, Tlazala de Fabela, Santa Ana Jilotzingo.

Sin embargo, al estar trabajando a pie de esta presa, me llevaba una gran decepción al llegar a un nuevo turno, pues la presa tenía una apariencia demasiado sucia y no por las aguas residuales que ahí desembocan, si no por basura que las personas arrojan de forma directa sobre ella. Es importante que cada uno de nosotros estemos conscientes como sociedad que las obras con fines sustentables no harán todo el trabajo, somos nosotros como seres humanos quienes también debemos reaccionar y tener respeto por nuestro planeta.

Por otro lado, como profesionista y residente de la obra tuve diversas vivencias que me hicieron aprender y crecer constantemente. Tal como: el trabajo en equipo, el trato directo con los trabajadores y la asignación de actividades, ya que en ciertas ocasiones puede ser una tarea difícil por la actitud que ellos pueden tomar, por lo que aprendí a tomar una postura firme para la toma de decisiones, incluso en situaciones de riesgo como accidentes en la obra; también a manejar situaciones adversas con los colonos del Fraccionamiento Campestre del Lago, quienes a veces se oponían al paso de las unidades de los proveedores y con quienes se tuvo que llegar a un acuerdo para poder laborar de forma continua de lunes a domingo, ya que por reglamento interno únicamente se puede trabajar en un horario de las 08:00 a las 17:00 hrs; también el trato directo con los directivos de la Comisión del Agua del Estado de México.

En cuanto a condiciones de trabajo, en campo no siempre fueron las adecuadas, ya que cada mes se tenían que rolar horarios, por lo que en un mes se trabajaba de las 07:00 a las 19:00 hrs para el turno diurno y para el turno nocturno de 19:00 a las 07:00 hrs los siete días de la semana, superando climas contrastantes tanto en el día por las altas temperaturas y en la noche por las bajas temperaturas e incluso presencia de hielo, también es importante mencionar el importante cuidado que debíamos tener los trabajadores de la obra por la presencia de animales

ponzoñosos y por personas ajenas a la obra que podían acceder por alguno de los senderos cercanos a la presa, representando un peligro ya que en tanto en el día como en la noche la zona de la obra se encontraba lejos de alguna autoridad que pudiera auxiliarnos.

Otro de los grandes retos a superar como residente de hincado fue desafiar mis miedos al tener que entrar hasta la parte más lejana del túnel para poder revisar el sobrecorte y el estado de las picas del escudo excavador al final de cada turno, aun cuando ya no estuviera presente ningún trabajador.

### **Fuentes consultadas.**

- Manuales de Procedimientos constructivos de Microtunel S.A. de C.V. (México)
- Manuales de Construcción de Lumbreras e Hincado de tubería de Zinzanja S.A. de C.V.
- Tesis: Saneamiento del Río Cuautitlán en el tramo Cortina Presa Guadalupe – Residencial La Luz, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U.Z., diciembre 2012.
- Construction Technology of Shallow Pipe- Jacking Working Shaft, Key Engineering Materials (Volumes 480-481), June 2011.
- Portal del gobierno del municipio de Cuautitlán Izcalli: [www.cuautitlanizcalli.gob.mx](http://www.cuautitlanizcalli.gob.mx), diciembre 2018.