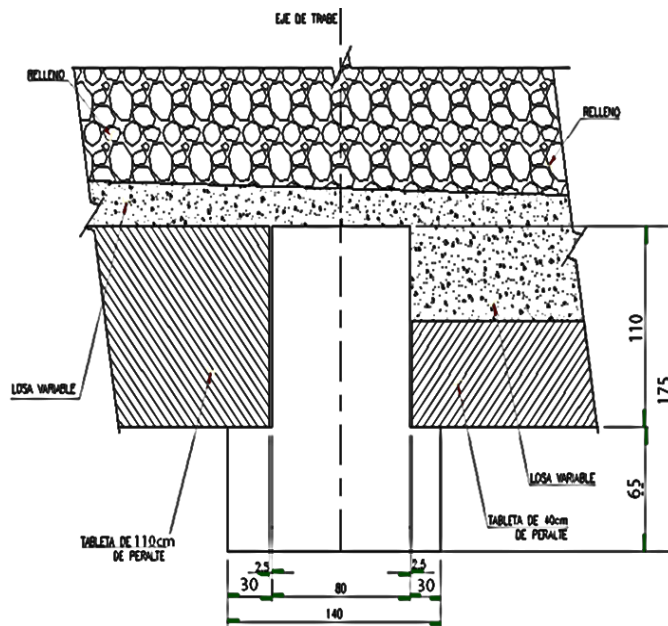


III. PROCEDIMIENTO DE SUB-EXCAVACIÓN SIN BANDEOS: EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO A NIVEL LOSA TAPA

Para el proyecto de la estación 20 de Noviembre, del Sistema de Transporte Colectivo Metro Línea 12, el sistema estructural de losa tapa se compone por traveses portantes para apoyar las tabletas, relleno, pavimento y carga vehicular. La trabe portante será de forma rectangular de diferentes secciones, según las cargas y el claro de la trabe. Estas a su vez tendrán 1 ménsula en cada costado con secciones en la mayoría de los casos de 30 cm x 65 cm, y con secciones que rigieron por las condiciones arquitectónicas del proyecto. La trabe portante sirve de apoyo a las tabletas pre esforzadas en el nivel de cubierta. Un esquema detallado se muestra en la figura 3.1



GEOMETRÍA DE TRABE DE CUBIERTA

Figura 3.1 geometría de la cubierta de losa tapa

Con el fin constructivo para la Estación 20 de Noviembre se construirá por medio de un sistema de sub-excavación que consiste en una construcción descendente o “Top-Down”, en la cual la primera etapa comprende el desplante de los muros Milán, tanto interiores como perimetrales. Para la construcción de la losa tapa, a partir de la cual se inicia el proceso de sub-excavación, se ejecuta la excavación del suelo hasta alcanzar el nivel en el cual se colocarán las vigas-traveses portantes que servirán de apoyo de las vigas pretensadas prefabricadas de la losa tapa; luego se continúa con la excavación del suelo hasta llegar al nivel de desplante de las losas mezzanine y de fondo, las cuales serán coladas contra el terreno. Entre las losas tapa y de mezzanine se dejarán unas aberturas (ventanas) para retirar el material excavado. Dichas ventanas serán cerradas una vez se termine la construcción de la losa de fondo y de las plataformas para los andenes.

En el segundo caso, el procedimiento constructivo llamado “sistema mixto” consiste en la ejecución de una primera excavación a cielo abierto, con niveles de troquelamiento, hasta el nivel de losa de mezzanine y una segunda excavación mediante el procedimiento “Top Down”.

La ejecución de la excavación a cielo abierto se realiza colocando tablestacado para contener la zona central, desde el cual se instalarán progresivamente troqueles en distintos niveles, hacia los muros exteriores, hasta que la excavación alcance el nivel inferior de la losa mezzanine; Después de eso, se colarán las losas de mezzanine y de cubierta en ambas franjas laterales. De igual forma, se procederá para la ejecución de la excavación y colado de las losas mezzanine y de cubierta en la zona central.

Finalmente, se continúa con la excavación bajo la losa mezzanine hasta alcanzar el nivel final de excavación y colar la losa de fondo, empleando el procedimiento denominado “Top Down” para esta última fase de excavación.

Con ambos sistemas constructivos se garantiza el confinamiento de las cimentaciones de las estructuras aledañas.

3.1. Condiciones estratigráficas y de desplante de la estructura

De acuerdo con los sondeos exploratorios realizados en la zona donde se construirá la estación, sondeos correspondientes a la campaña de exploración preliminar y los sondeos de la campaña complementaria, se identificó una capa de material heterogéneo de baja humedad compuesta por arcilla arenosa con gravas y residuos de construcción presentes hasta una profundidad de 1,50 m, subyacente por una capa de arcilla de baja plasticidad con lentes de arena fina compacta desde una profundidad de 1,50 m hasta 8,50 m. Posteriormente, de 8,50 m a 11,50 m se encuentra una capa de arcilla de alta plasticidad y humedades altas, cuyo espesor se reduce gradualmente hasta desaparecer en el tramo comprendido entre las estaciones 20 de Noviembre e Insurgentes Sur. Hasta una profundidad de 17 m se observa una capa de arcilla arenosa de consistencia dura y baja plasticidad. Finalmente, entre los 17 m y 40 m se identificó una capa de arena arcillosa muy compacta con gravas de humedades bajas que corresponde a los depósitos de Las Lomas. Tal y como se muestra en la Tabla 2.3 del capítulo II.

En cuanto a las condiciones hidráulicas del sitio, el nivel de aguas freáticas (NAF) se detectó a la profundidad de 7.70 m; teniendo en cuenta lo anterior, y en concordancia con la estratigrafía típica en la zona de transición alta, se considera un manto de agua colgado. Por lo que la estación piezométrica más próxima al sitio reportó que la presión de poro se mantiene condiciones estables con un abatimiento nulo.

Considerando la condición piezométrica crítica del agua intersticial que actualmente prevalece en el subsuelo, se estima una magnitud del hundimiento regional en el lugar del orden de 3.00 cm. a largo plazo.

El procedimiento que se pretende habilitar para realizar la excavación y construcción de la estación consistirá en utilizar los muros milán como elementos de contención y a su vez

como elementos estructurales de cimentación para sostener la estructura de losa tapa la cual se utilizará como cubierta de un puente temporal para el tránsito de los vehículos y perturbar en la menor medida el flujo vehicular; lo anterior permitirá que se ejecute la extracción de los sedimentos lacustres por debajo de la losa de mezzanine mediante la técnica de sub-excavación.

Debido a que los muros Milán estarán sometidos a empujes de tierras de magnitud considerable producto, por un lado, de la gran profundidad de excavación y por otro, de las colindancias existentes al pie de la excavación, aunado a que la alternativa contempla que los muros reciban prácticamente toda la carga en la medida que avance la excavación y construcción de la estación y con el objetivo de lograr estabilizar los elementos de contención, se requieren empotramientos de consideración de los muros Milán bajo el nivel máximo de excavación, tales longitudes de empotramientos serán variables, siendo condición necesaria que su desplante se realice dentro de los depósitos volcánicos del lugar. Tal como se muestra en el **Anexo 1 Condiciones estratigráficas y propiedades del subsuelo**.

3.2. Cimentación adoptada

En función del tipo de suelo, de la geometría de la estación y de las solicitaciones a que estará impuesta durante su vida útil, se adoptó una cimentación a base de muros milán que sirvan como elementos de retención de tierras y al mismo tiempo actúen como soporte permanente de las cargas que transmitan los diferentes niveles de la estación, siguiendo el procedimiento de sub-excavación, logrando así una rápida restitución de vialidades en la superficie.

Por requerimientos del procedimiento de sub-excavación y para lograr la sustentación de la estructura de puenteo temporal constituida por la losa tapa, es preciso que los elementos de cimentación, en este caso los propios muros Milán, se desplanten en estratos competentes que proporcionen la capacidad de carga adecuada, por consiguiente, el desplante queda restringido a los depósitos volcánicos detectados a profundidades del orden de 17.00 m, la condición anterior define la cimentación adoptada, constituida por los muros Milán con trabajo de punta empotrados en los depósitos profundos.

La solución de la cimentación anterior se desarrolló en base a los lineamientos establecidos en el Reglamento vigente del Distrito Federal, en donde la capacidad de punta de los muros Milán deberá ser capaz de tomar las cargas de la estructura de la estación en su totalidad, considerando sus correspondientes factores de carga y para las diferentes condiciones estática y dinámica que demandará la estructura durante su vida útil.

No se consideró que el suelo al nivel de desplante de la losa de fondo pueda tomar parte de las cargas, condición impuesta por el propio procedimiento constructivo, ya que la losa de fondo resulta ser el último elemento estructural por colocarse dentro del proceso de excavación y construcción de la estación. Por tal motivo, la carga transmitida por la misma losa es tomada prácticamente en su totalidad por los muros Milán.

3.3. Aspectos geotécnicos considerados

Para definir la estabilidad de la excavación y su correspondiente procedimiento constructivo, que permitan un adecuado comportamiento durante la apertura y construcción de la estación, se revisó el estado límite de falla de acuerdo a las condiciones que estarán impuestas durante la obra considerando las propiedades del subsuelo del sitio, de acuerdo a lo siguiente:

- Estratigrafía y propiedades
- Estado de esfuerzos en el subsuelo y piezometría
- Cargas
- Estación
- Muro Milán
- Procedimiento constructivo

3.4. Estratigrafía y propiedades

Se ejecutaron dos campañas de exploración: una preliminar para determinar la factibilidad técnica del proyecto en el año de 2001 y una complementaria en 2008 en función del trazo definitivo de la línea. Los sondeos representativos que fungieron como base para la determinación de la estratigrafía y caracterización del subsuelo del sitio corresponden al SM-07 y SM-08 de la campaña de 2008. Para lo cual la estratigrafía se presentó en la Tabla 2.3.

Propiedades de resistencia

Las propiedades de resistencia se obtuvieron a partir de las pruebas triaxiales ejecutadas en muestras seleccionadas de los sondeos SM-07 Y SM-08, Los parámetros de resistencia al corte (c y Φ) en condiciones no consolidadas no drenadas, consolidadas no drenadas y consolidadas drenadas se podrán determinar directamente del ensaye triaxial. Para el caso de condiciones no consolidadas no drenadas y consolidadas drenadas, los parámetros se podrán obtener del ensaye de corte directo. Se podrá obtener información de parámetros de resistencia al corte no drenada (UU) de ensayos en campo de cono y veleta. Así mismo, este parámetro podrá determinarse de pruebas de compresión, inconfiada, penetrómetro de bolsillo y torcómetro.

3.5. Estado de esfuerzos en el subsuelo y piezometria

Las condiciones hidráulicas del sitio se obtuvieron a partir de la estación piezométrica más cercana, que corresponde a la estación EPZ-2, instalada en 2008 de la cual se reportan sus últimas lecturas piezométricas, tales lecturas en los pozos de observación y piezómetros ubicados hasta una profundidad de 7,50 m indican un nivel freático que alcanza profundidades entre 2,0 m y 6,0 m. En contraste, los piezómetros ubicados entre 15,50 m y 20 m no indican la presencia de agua en forma consistente. Teniendo en cuenta lo anterior, y en concordancia con la estratigrafía típica en la zona de transición alta; se considera un manto de agua colgado ubicado en la parte superior del depósito entre 2,0 m y 11 m de profundidad.

La estimación del hundimiento regional se realizó en función de las condiciones piezométricas indicadas lo que arrojó como resultado que el hundimiento a largo plazo en la zona de la estación es de 3 cm, dicho hundimiento se llevara a cabo en un periodo del orden de 30 años con una velocidad de hundimiento de 0.1 cm/año, cabe aclarar que dicho hundimiento se asocia a cambios piezométricos y al reacomodo de las partículas del detrito superficial susceptible a presentar el fenómeno de la tubificación a largo plazo. Por tal motivo no se desarrollaran fricciones negativas en las caras externas del Muro Milán no siendo necesaria la colocación del sistema antifricción.

3.6. Cargas

El peso de la estación se obtuvo a partir de la información proporcionada por el área de estructuras, la cual se muestra en la Tabla 3.1

Concepto	Peso(ton)
Peso de tabletas, relleno y firme	23423.19
Trabes portantes (losa tapa)	1284.73
Trabes de acostillamiento (losa tapa)	427.74
Muros milan	28734.4
Columnas	554
Muros de acompañamiento	2036.7
Muros estructurales (mezzanine)	939.15
Muros de mamaposteria (mezzanine)	122.74
Losa, trabes portantes y trabes de acostillamiento(mezzanine)	3284.8
Losa de anden	2681.54
Muros no estructurales(losa de fondo)	272.74
Plantilla	1108.58
Losa de cimentacion y contratabes	13730.72
Escaleras	1072.82
Total	79673.85

Tabla 3.1 cargas en la estación 20 de nov.

3.7. Estación

Para el análisis de la estación se consideraron los siguientes aspectos:

- Condición de compensación

El tipo de cimentación adoptada para la estación no contempla ningún tipo de compensación, ya que las cargas son transmitidas a los depósitos de alta resistencia al esfuerzo cortante y baja compresibilidad.

- Falla de fondo

El mecanismo de falla analizado para materiales arcillosos y limosos se desarrolla como una superficie de falla que pasa debajo del muro y hacia el interior de la excavación como consecuencia de una falla de capacidad de soporte debida a la descarga del suelo en el fondo de excavación.

Los factores de seguridad mínimos establecidos por el Manual de Diseño Geotécnico en el numeral 2.4.2 son mayores o iguales a 1.7 para excavaciones cercanas a edificios susceptibles de sufrir daños por asentamientos, en una distancia igual al ancho de la excavación. Para otros casos, se establece un Factor de seguridad mínimo 6 1.5. En caso de no satisfacerse los límites establecidos, será necesario limitar la longitud de avance de la excavación o aumentar la profundidad del muro Milán. En el caso de materiales no cohesivos, la falla de fondo se genera como un proceso de tubificación debida a un gradiente hidráulico mayor al gradiente crítico del material del fondo de la excavación.

- Falla por flotación

Para la revisión de la estabilidad de flotación se considera lo siguiente:

- Se analizara la fuerza de flotación hasta el nivel del NAF, suponiendo que las condiciones piezometricas en la zona de la estación se restablezcan.
- Se tendrá que revisar que la fuerza de flotación es menor que la suma del peso total de la estructura más el efecto de la fricción negativa afectada por un factor de reducción.

- Falla por sub-presión

Dentro de los análisis que se efectúen para muros de contención es necesario revisar este criterio el cual se puede presentar cuando se tenga en el fondo de la excavación un estrato permeable subyaciendo un estrato de arcilla. El factor de seguridad mínimo para éste tipo de análisis de acuerdo con lo establecido en el Manual de Diseño Geotécnico editado por la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR) será de 1.3; en caso tal que no se logre obtener dicho valor se deberá pensar en la posibilidad de abatir el nivel freático, para de esta manera reducir las fuerzas de filtración, teniendo presente las consideraciones particulares que esta actividad implicaría.

3.8. Muro milán

El muro Milán es una estructura de concreto armado, colado en sitio (in situ). Sirve principalmente como apoyo a las cimentaciones o para contener cortes verticales en excavaciones. Sus aplicaciones en las construcciones civiles son muchas, y entre ellas podemos mencionar obras subterráneas y túneles urbanos (Metro), sótanos y cajones de cimentación de edificios, estacionamientos subterráneos, muelles, presas, silos, canales de gran sección y cárcamos de bombeo de gran capacidad.

El sistema constructivo contempla que cada sistema de piso correspondiente a los niveles de losa tapa, losa de mezzanine y losa de fondo actúen como puntales que restrinjan el desplazamiento lateral del muro en la medida que avance la excavación, así mismo, los niveles quedan definidos por la propia estructuración. En el **Anexo 2 Procedimiento constructivo del Muro Milan** se detalla lo anterior mente dicho. En la Figura 3.2 se muestra la cimentación a base de muro Milán y para las cuales se tienen que analizar los siguientes parámetros:

- Condiciones de arriostramiento
- Empujes activos
- Empujes redistribuidos
- Empujes pasivos
- Longitud requerida de la pata
- Módulos de reacción laterales
- Capacidad de carga de punta
- Diseño de lodo bentonítico
- Diseño de lodo fraguante
- Análisis de la estabilidad de la zanja crítica

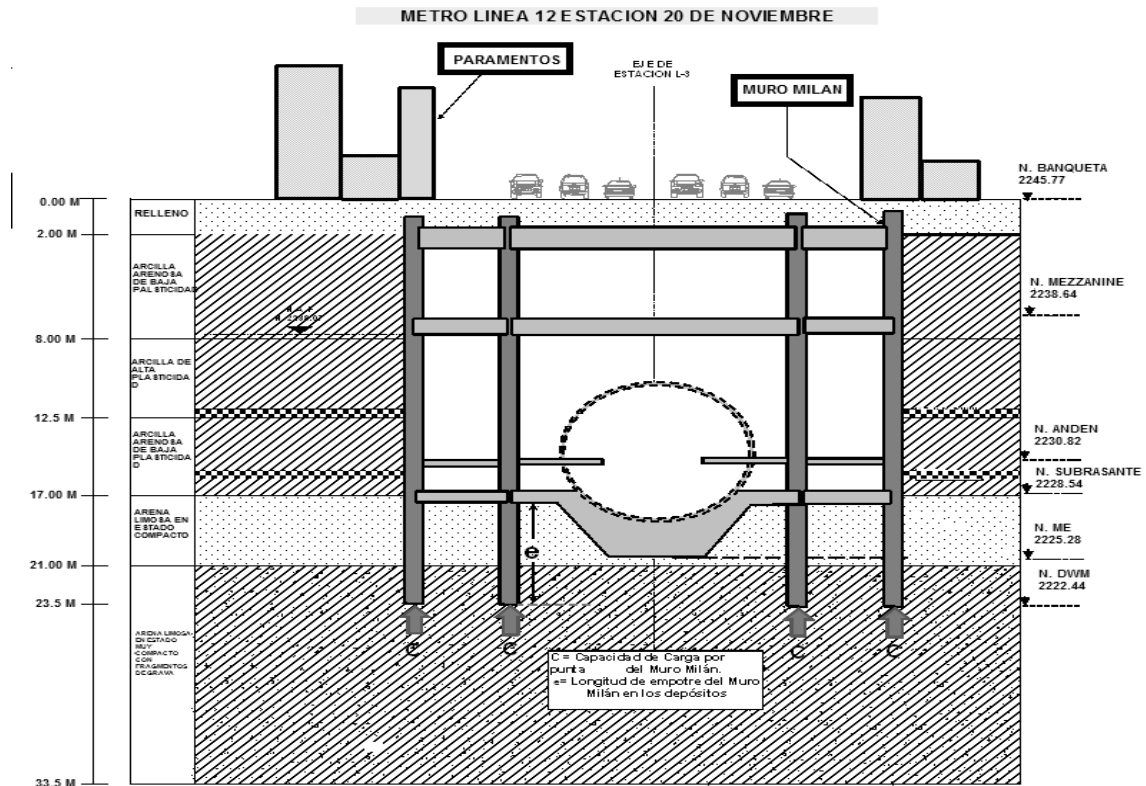


Figura 3.2 Cimentación adoptada en la estación 20 de Noviembre a base de Muro Milán

3.9. Procedimiento constructivo

Antes de hablar del procedimiento constructivo se citaran algunos conceptos:

- **EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO:**

Las excavaciones poco profundas pueden hacerse sin sostener el material circunvecino y dejando simplemente taludes adecuados, siempre que exista el espacio suficiente para ello. La inclinación de los taludes es función del tipo de suelo o roca, de la homogeneidad de las capas y su competencia, del flujo de agua, de las vibraciones, de las condiciones climáticas, de la profundidad de la excavación y del tiempo que esta vaya a permanecer abierta. El talud máximo que un suelo puede presentar depende de la resistencia al esfuerzo cortante del mismo. Si existe arcilla blanda abajo del nivel de la base de la excavación, es necesario tomar las precauciones necesarias para evitar el bufamamiento del fondo. Las arcillas duras desarrollan comúnmente grietas cerca de la superficie del terreno, las cuales, si se llenan de agua, pueden ocasionar fallas en los taludes, debido a

que la presión hidrostática reduce el factor de seguridad de los mismos. Para ello se tienen que revisar los siguientes parámetros:

- Análisis de expansiones elásticas
- Estabilidad de taludes de excavación
- Empujes sobre Muro Milán
- Cálculo de la longitud en avances laterales

• **SUB-EXCAVACIÓN:**

El término subexcavación se refiere esencialmente al proceso que consiste en extraer ordenadamente pequeños volúmenes de suelo para hacer descender de manera lenta y controlada la excavación de los niveles inferiores de la futura estación, mediante la extracción de suelo en los estratos más compresibles debajo de ellas. Para ello se hacen los siguientes análisis:

- Análisis de expansiones elásticas
- Estabilidad de taludes de excavación
- Determinación de la magnitud de contra-flechas por recompresión

El entorno urbano donde se construirán las estaciones profundas es complejo, para ello se ha optado por el empleo del sistema “Top–Down” (sub excavación) para la construcción de la estación 20 de Noviembre, el cual consiste en la excavación y construcción a cielo abierto en las franjas laterales de la estación hasta nivel de losa tapa empleando Muro Milán y troqueles con taludes de avance que cumplan con la relación 1 horizontal x 1 vertical con la calle parcialmente cerrada (ver figuras 3.3,3.4,3.5), continua la excavación y colado en una primera etapa hasta el nivel de losa de tapa; dejando espacios huecos bajo de la losa tapa para iniciar la excavación subterránea. Una vez terminada la losa de tapa se rellenan las excavaciones, se restituye la vialidad y se restablece el tráfico local, afectando lo menos posible el entorno urbano. Y se continúa con la excavación para llegar al nivel de la losa de mezzanine, de la cual se hablara más adelante en el tema 4.10.



a) Excavación de zanja para Muro Milán



b) Armado e izaje del Muro Milán

Figura 3.3. Proceso constructivo del Muro Milán



a) Preparación del terreno



b) Colocación de troqueles

Figura 3.4. Sistema de Troquelamiento



Figura 3.5. Preparación y colado de la losa tapa