



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Consideraciones prácticas
para el eficiente diseño y
construcción de Muro Milán**

TESINA

Que para obtener el título de
Especialista en Geotecnia

P R E S E N T A

Jonathan Tirado Juárez

DIRECTOR DE TESINA

M. en I. Walter Iván Paniagua Zavala



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



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

OBJETIVO Y ALCANCE	3
INTRODUCCION	4
1.PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO	4
2.EXCAVACION	10
a. Maquinaria y equipo.....	10
b. Control del volumen de excavación	15
c. Problemas de excavación en maquinaria a diferentes profundidades	16
3.ESTABILIDAD DE LA EXCAVACION CON LODO BENTONITICO	17
a. Control de calidad.....	18
i. Contenido de arena	18
ii. Viscosidad.....	20
iii. Peso específico	20
4.ACERO	20
4.1 Machi-hembrado en las juntas de los tableros de muro Milán	20
4.2 Distribución del acero para uso de tubería de suministro de concreto	23
4.3 Elementos de rigidización para el izaje.....	25
5.CONCRETO	27
5.1 Control de suministro de concreto	27
5.2 Correlaciones volumen teórico contra volumen real suministrado	29
6.CONCLUSIONES	36
REFERENCIAS.....	37
Bibliográficas	37
Digitales.....	37

OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo principal de este trabajo es el de dar a conocer a todos los proyectistas encargados del diseño estructural de muros pantalla, en especial del denominado “Muro Milán” las consideraciones constructivas en el ejercicio profesional *ejecutivo*, con la finalidad de eficientar las etapas de diseño y posterior construcción. El alcance de este trabajo es encontrar que dentro de las consideraciones constructivas para un proyecto **determinado** en una zona geotécnica **específica** fue posible encontrar una relación entre su suelo y el sobre-volumen de concreto requerido durante la etapa de suministro.

INTRODUCCION

Cuando se habla de construir edificaciones en suelos blandos se sabe de antemano que se tendrán varias complicaciones durante el proceso de diseño y construcción, si además nos encontramos en condiciones en las que el suelo presenta poca resistencia al esfuerzo cortante, problemas de expansión o lentes de suelos granulares que permiten el flujo de agua hacia la excavación entonces se tiene que tener especial cuidado en la planeación del proceso constructivo.

Los muros pantalla o por sus nombres genéricos comúnmente usados en la Ciudad de México “Muros Milán” y “Muros Berlín” se refieren a muros de contención para el sostenimiento de excavaciones profundas. Estos muros por si solos no presentan ninguna resistencia estructural ante el volteo que provoca el empuje del suelo y las sobrecargas en la superficie por lo que deben estar acompañados siempre de un sistema de apuntalamiento.

La principal razón para elegir el muro Milán sobre el Muro Berlín es cuando tenemos el nivel de aguas freáticas por encima del nivel de la profundidad máxima de excavación, es decir, el Muro Milán se usa debido a que es impermeable y permite trabajar en condiciones estancas cuando el NAF se encuentra dentro de la profundidad de excavación, cuando no hay ningún problema de filtraciones hacia la excavación es recomendable el uso de Muro Berlín por su velocidad de construcción y también porque su costo suele ser menor al de Muro Milán.

Debido a que en muchos de los casos el ingeniero estructurista no se involucra en el diseño de elementos de cimentación o en el procedimiento constructivo de la misma es que los planos estructurales terminan siendo inconstruibles o deficientes en su diseño lo que ocasiona cambios posteriores en el diseño estructural, re-diseño o eliminación de elementos.

1.PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

La construcción del Muro Milán consta de diferentes etapas que van desde la preparación del terreno hasta la ejecución del colado y la posterior excavación del terreno, a continuación, se desarrollaran las diferentes etapas:

- Trazo y nivelación: El trazo para la construcción del Muro Milán está definido por el proyecto arquitectónico, es decir por los espacios previamente definidos en el modelo creado por el despacho de arquitectos, no se debe confundir con el proyecto estructural debido a que este no gobierna sobre los espacios, solamente da indicaciones sobre los elementos construibles.

Dicho trazo será colocado por los topógrafos sobre los espacios libres e inamovibles es decir sobre las paredes de las colindancias, marcas en banquetas, postes, tapiales permanentes, etc. Estas marcas comúnmente conocidas en el argot de campo como “Palomas” servirán para que los Maestros de Obra puedan ubicar sus marcas y guías de construcción (reventones) en la *fotografía 1.1*. se puede observar de color verde la marca +1.00 donde el brocal (de concreto) comienza en el nivel ± 0.00 .

La nivelación de la misma manera que el trazo marcara en diferentes lugares una altura arbitraria con respecto al nivel ± 0.00 que marca el proyecto arquitectónico, es común que para facilidad de lectura las marcas tengan una altura +1.00, es decir, un metro debajo de la marca es el nivel cero del proyecto arquitectónico. Estas marcas deben colocarse en todo el perímetro del predio para que sea fácil para los constructores encontrar los niveles por debajo del nivel cero para la construcción de elementos subterráneos.

Una vez que se obtienen los trazos y los niveles se pasara a la siguiente etapa, la construcción del brocal.



Fotografía 1.1

- Construcción del Brocal: Para comenzar con el procedimiento de construcción del Brocal es necesario primero definirlo. El Brocal es un elemento no estructural que tiene la única

función de guiar al equipo de excavación, se ubica a lo largo del perímetro del trazo del muro y tendrá la altura necesaria para evitar que el equipo de excavación juegue y deje de excavar verticalmente, esta altura va de los 1.2 a los 1.5 metros (a menos que se especifique en el proyecto estructural de otra manera), las cuales están definidas al mismo tiempo por las dimensiones de las hojas de triplay más comunes en el mercado.

Al ser un elemento no estructural su armado es simple con varilla del No. 3 o 4 espaciado a cada 15 o 20 cm en ambos sentidos, el concreto que se usa es hecho en obra o de planta concretera con resistencias bajas que van de los 150 a los 200 de resistencia nominal $f'c$.

Se inicia con la construcción de uno de los lados del brocal de manera que se garantice su verticalidad, una vez alcanzada la resistencia suficiente se procede a la construcción del otro lado del brocal (*ver fotografías 1.2 y 1.3*)

Cabe destacar que la geometría del brocal será definida en muchos casos por las condiciones del terreno natural, no es raro que termine pareciendo escalonado a lo largo del perímetro ya que de cualquier manera las marcas de nivel antes dejadas por el topógrafo son las registrarán los niveles de colocación del armado y los niveles de colado.



Fotografía 1.2 y 1.3

- Excavación: La excavación de los tableros se realiza con maquinaria especializada siendo los más comunes las “almejas” (usualmente usados en suelos blandos) y las hidrofresadoras (usadas en suelos duros y/o compactos) (*Ver fotografía 1.4, 1.5 y 1.6*) las cuales excavan segmentos alternados del muro llamados “tableros” siendo los tableros hembra los que se construyen primero, es decir, se construyen primero los tableros que necesitan juntas para su colado. Posteriormente se procede a regresar a las posiciones que no han sido coladas que quedan entre los tableros ya colados y con la resistencia suficiente para resistir las maniobras.



Fotografía 1.4

Mientras se va aumentando el nivel de excavación las paredes de suelo se vuelven cada vez más inestables por lo que es necesario el uso de ademes, el lodo bentonítico y aditivos poliméricos son las dos formas en que con presión hidrostática y formación de costras es que se mantiene la estabilidad en la excavación.



Fotografía 1.5 y 1.6 donde se observa la “mordida” de la almeja

- Colado: El colado se realiza a tiro directo dentro de una tubería que llega a la profundidad de excavación menos 0.5 m, esta tubería con el nombre de “Tremie” esta segmentada y se une mecánicamente, la razón de estar segmentada es para poder hacer cortes en su tamaño conforme va aumentando la altura del concreto dentro de la excavación, de manera que la carga que se ejerce dentro de la tubería sea siempre mayor a la carga que el concreto ejerce en el extremo bajo de la tubería impidiendo el flujo del concreto. Cabe destacar que ya que el concreto no fluye con la misma facilidad que el agua si tenemos tableros con grandes dimensiones será necesario colocar dos o más posiciones de colado para evitar que el concreto se acumule en un solo lugar (*ver fotografía 1.7*)



Fotografía 1.7

Además, es importante mencionar el mecanismo mediante el cual se garantiza que el concreto no tendrá contacto directo con el ademe, se utiliza comúnmente una pelota de vinil que servirá como barrera entre el concreto y el lodo/polímero que se encuentra dentro de la tubería Tremie, esta pelota se desplazará con la carga del concreto y saldrá una vez que el concreto llegue al final de la tubería, posteriormente veremos a la pelota flotar en la superficie de la excavación para ser retirada (*fotografía 1.8*)



Fotografía 1.8

- Retiro de juntas: En los muros hembra en los cuales es necesario el uso de juntas se tienen que retirar cuando el fraguado está en su primera etapa y solo tiene la resistencia suficiente para mantener la geometría del tablero, si se deja la junta constructiva (*fotografía 1.9*) durante demasiado tiempo el concreto se endurece lo suficiente para evitar que sea retirada la junta de manera convencional y será necesaria maquinaria especializada para retirarlas.



Fotografía 1.9

2.EXCAVACION

a. Maquinaria y equipo

- Para la excavación la maquinaria necesaria dependerá en mayor medida del procedimiento constructivo, en algunas ocasiones se procede a realizar una perforación previa en los tableros hembra para garantizar la verticalidad de la excavación, la perforación previa se realiza cuando la profundidad de excavación es grande y la auto nivelación de la almeja (por gravedad) ya no es garantía suficiente de verticalidad, en estos casos se requieren

perforadoras hidráulicas sobre orugas con tubería desplegable “Kelly”. (*Ver fotografía 2.1, 2.2 y 2.3*).



Fotografía 2.1 y 2.2



Fotografía 2.3

- Para la excavación es necesaria una grúa draga sobre orugas la cual cumplirá tres funciones esenciales; realizar la excavación de los tableros, manipulación y colocación del armado del acero de refuerzo y sostener la tubería de colado. (*Fotografía 2.4 y 2.5*)



Fotografía 2.4 y 2.5

- Dependiendo del tipo de ademe líquido que se usará para estabilizar las paredes se elegirá el equipo de fabricación siendo siempre necesarios contenedores para agua y lodos, motobombas, tubería rígida y tubería plegable de lona (*Fotografías 2.6, 2.7 y 2.8*)



Planta de fabricación de lodos fotografía 2.6



Bomba Uniservice fotografía 2.7

Para la fabricación de lodo bentonítico es necesario un turbo mezclador y para la fabricación de ademe polimérico tubería con salida de chiflón es más que suficiente para su fabricación. (Ver fotografía 2.8)



Turbo mezclador fotografía 2.8

- En situaciones en que no se cuenta con la cantidad de agua suficiente para la frecuencia de fabricación de lodos necesaria es común el uso de desarenadores, cuando el lodo es recuperado de la excavación generalmente regresa contaminado con arena y otros materiales

pertenecientes al suelo que al asentarse en los cantos de las varillas en el acero de refuerzo representan un peligro estructural por lo que se procede a recuperar el lodo y limpiarlo de la mayor cantidad de impurezas posible para poder reutilizarlo al mezclarlo con lodo limpio.

- La excavación se realiza fundamentalmente con dos tipos de maquinaria, para suelos blandos se usan excavadoras de zanjas con mandíbulas (cuchara bivalva) llamadas comúnmente en México “Almejas” (*Ver fotografía 2.9 y 2.10*) las cuales tiene como ya se había mencionado mandíbulas que muerden pedazos de suelo que al cerrarse almacenan dentro el material excavado.



Almeja excavando fotografía 2.9 y 2.10

Cuando el suelo es duro y/o está muy compactado (en caso de suelos gruesos) el uso de almejas es impensable ya que al intentar morder no lograra sacar ningún bocado, por lo que se procede al uso de hidrofresas las cuales por medio de ruedas dentadas giratorias van arrancando del suelo por medio de fricción pedazos de suelo duro o roca suave.

Cuando es requerida la construcción de muro pantalla en roca sana de mediana/alta resistencia se procede a romper mediante trépanos/barretones de gravedad o perforadoras

con brocas especializadas para el tipo de roca a excavar, para poder sacar posteriormente los fragmentos con almejas de carga.

- Para el colado es necesaria la tubería de colado seccionada, las secciones permiten que se mantenga la diferencia de cargas hidrostáticas necesarias para mantener el concreto fluyendo y además para adaptarse a las diferentes profundidades de excavación de los tableros, esta tubería está acompañada de un embudo que permite dirigir el concreto a la tubería, trampas que permiten fijarla en el brocal cuando la grúa tiene que dejarla y realizar otra maniobra y también se requiere un Swivel el cual mantiene los cables de la grúa desanudados durante el movimiento del colado además de equipo menor de igual importancia.

b. Control del volumen de excavación

Cuando se va a realizar la excavación se debe tener especial cuidado en tres aspectos fundamentales: Mantener la verticalidad de la excavación, mantener la geometría del tablero y evitar los caídos en las paredes de la excavación.

- Mantener la verticalidad de la excavación: Aunque la guía de excavación del equipo (brocal) se construye previa a la excavación, cuando la profundidad del muro es de varias decenas de metros es fácil por unos cuantos grados ir perdiendo la verticalidad hasta encontrar desfases importantes que significaran grandes problemas a la hora de realizar la excavación y la posterior construcción del proyecto civil. Para evitar estos problemas se realizan perforaciones previas, dependiendo el tamaño de la apertura del equipo de excavación con la que se realizaran los trabajos es que se programara la distancia entre perforaciones, de manera que el equipo vaya quitando únicamente el material que queda entre las perforaciones y no pierda la verticalidad que su peso propio le da.
- Mantener la geometría del tablero: Cuando se ha terminado la excavación se debe realizar un sondeo minucioso del fondo de la excavación con un plomo simple de varilla y cable de acero, cabe destacar que también existe equipo de última generación que realiza el sondeo por medio de un “sonar” con el cual va dibujando el perfil de la excavación mientras es introducido, pero no es comúnmente usado en el país.
- Detectar los caídos en las paredes es virtualmente imposible debido a que a menos que se cuente con equipo de punta no se pueden sondear las paredes con los métodos tradicionales por lo que se deben identificar previamente zonas vulnerables en el perfil estratigráfico y procurar disminuir la velocidad de excavación al llegar a tales zonas, también es común colocar cimbra provisional de madera en los armados de acero de refuerzo para tapar las cavernas que se pudieron haber creado en las paredes y evitar que el concreto se fugue. (***Ver fotografía 2.11***)



Preparación de triplay y poli estireno forrado fotografía 2.11

c. Problemas de excavación en maquinaria a diferentes profundidades

Cuando se comienza a excavar a profundidades que superan los 20 metros en las zonas de lago y transición en la Ciudad de México se comienzan a tener problemas en la velocidad de avance de la excavación debido a que se encuentran los estratos resistentes, así como los lentes de arenas compactadas y las arcillas consolidadas. Suele escucharse en la práctica profesional que a esas profundidades la almeja “flota” debido a que al no morder el suelo adecuadamente se adjudica el problema a pensar que la presión hidrostática producida por la bentonita a esas profundidades produce un efecto de flotabilidad, pero como sabemos la presión hidrostática es igual en todos los sentidos a cualquier profundidad de estudio por lo que no se produce flotabilidad (Ver figura 2.#).

Se debe considerar cuando el proyecto de muro Milán es de más de veinte metros la posibilidad de usar almejas con pesos mayores o el colocar contrapesos en estas mismas de manera que se mantenga la constancia en la velocidad del avance en la excavación.

3. ESTABILIDAD DE LA EXCAVACION CON LODO BENTONITICO

Como ya se mencionó anteriormente la excavación no es capaz por si misma de mantener la estabilidad en sus paredes por lo que es necesario el uso de ademes, debido a que es imposible colocar cimbras en excavaciones muy grandes es que se recurre al uso de la presión hidrostática como fuerza equilibrante, el agua por si misma tampoco es capaz de contrarrestar los esfuerzos horizontales que se producen en la excavación por lo que se necesita agregar algún tipo de aditivo que: aumente la densidad del agua, cree una capa que prevenga el disgregamiento del suelo o ambas. Los dos aditivos que se usan son:

Bentonita: Arcilla montmorilonítica con limite liquido alto, que permite una gran hidratación entre sus partículas sin variar sus propiedades cohesivas por lo que cuando se deja reposar después de hidratado se irá viendo un aumento considerable en su resistencia al corte, es esta propiedad la que produce una capa denominada por la palabra anglosajona “cake”, esta capa es una especie de costra que se forma en las paredes de la excavación evitando que de ser suelo grueso este se disgregue y produzca caídos. Es por esta misma razón que una excavación no puede ser dejada abierta mucho tiempo, conforme va pasando el tiempo la costra va aumentando de espesor y en muros diseñados para trabajar por fricción se tendrá una disminución significativa en dicha fricción suelo-muro.

Polímeros: Los polímeros son cadenas largas de monómeros, que por su forma y naturaleza tienen la función principal de adentrarse entre las partículas de suelo e ir creando una capa que evite la disgregación de estas mismas, los polímeros no aumentan la densidad ni la viscosidad del agua por lo que su principal uso está en excavaciones pequeñas, cercanas a los 10 metros o en excavaciones que tienen la presencia de suelos gruesos saturados. Aunque el uso de los polímeros no está limitado por las dos situaciones antes expuestas es preferible por muchos contratistas el uso de lodo bentonítico en excavaciones profundas debido a su disminuido costo versus el costo de los polímeros y además a que los polímeros resultan ser inútiles cuando los suelos están secos y son altamente permeables debido a que al no aumentar la viscosidad del agua el polímero permea en el suelo y se pierde fácilmente.

Ambos ademes líquidos deben ser cuidadosamente estudiados y elegidos dependiendo de las condiciones expuestas en los perfiles estratigráficos y a la profundidad de construcción del muro pantalla. Cabe destacar que el lodo bentonítico significa además costos adicionales en procesos posteriores de construcción ya que contaminan el concreto en la parte superior del muro. Cuando se construya la trabe de coronamiento se deberá demoler cierta cantidad de concreto contaminado para

asegurar que se trabaje únicamente con el concreto que cumple con las características necesarias estructuralmente, esto mismo no pasa con el uso de polímeros debido a que no contaminan el concreto y prácticamente el terminado del concreto está sano para construir la trabe de coronamiento y solo serán necesarios trabajos de escarificación o demolición superficial.

a. Control de calidad

i. Contenido de arena

La arena se encuentra presente en todas las zonas geotécnicas de la ciudad de México ya sea como lentes o como estratos y suelen representar un problema a la hora de realizar excavaciones para la construcción de Muros Pantalla, ya sea porque dificulta el avance de la maquinaria (si estas se encuentran compactadas) o por la contaminación que pueden producir en el concreto y el acero de refuerzo.

Esta contaminación siempre representa un riesgo debido a que es un material que se disgrega fácilmente con el agua, si se junta mucha arena en una zona y queda contenida dentro del concreto (transparencias) cuando el agua del subsuelo comience a intentar infiltrarse y encuentre estas transparencias no encontrará resistencia alguna en su flujo, además de por sí solas representar un problema las infiltraciones afectarán el acero de refuerzo y lo debilitarán por lo que cobra doble importancia el cuidar los contenidos de arena en las excavaciones además con fluidos.

Cuando el terreno natural tiene alguna zona en su estratigrafía con arenas o si los estratos de suelo fino tienen porcentajes de arena importantes a la hora de excavar encontraremos que ésta caerá en el ademe líquido que estamos usando. Cuando se está usando lodo bentonítico la arena se quedará en suspensión y será más fácil de recuperar cuando se cuele el muro y se extraiga la bentonita, si por otro lado se está usando un polímero la arena se precipitará directamente al fondo y es importante limpiar la excavación antes de colocar en posición el armado para garantizar que no tenemos arena en el fondo que contamine el muro.

Además de esto la arena suele representar un problema en la estabilidad del lodo ya que afecta la viscosidad y la tixotropía por lo que de tener mucha arena no se garantiza una correcta formación del *“Cake”* y se pueden producir caídos en las paredes.

Cabe destacar que la bentonita comercial contiene siempre una cantidad de arena natural, de hecho, la calidad (y el costo) de la bentonita depende directamente del porcentaje que tenga, debido a esto y a los caídos que se presentan durante la excavación es que se necesita llevar un control de calidad de la cantidad de arena en el lodo.

El equipo de laboratorio que se usa en campo es muy sencillo, se llena una probeta graduada hasta la marca de aforo con el lodo bentonítico, después el lodo se hace pasar por una malla No.200 para

separar los finos de las arenas, esta malla tiene un acoplamiento por ambos lados por lo que al girarla las arenas quedarán debajo de la malla, de esta forma se puede hacer un lavado con una pipeta para atrapar las arenas en la misma probeta que usamos al principio, la graduación que esta tiene nos da una lectura directa del porcentaje de arena.

El control de calidad de la bentonita siempre se hace en diferentes fases de la construcción del muro, siendo la más importante la fase de excavación.

ETAPA DE CONSTRUCCIÓN	PRUEBAS A REALIZAR	CONTENIDO MÁXIMO PARA ASEGURAR CALIDAD
PREVIA: FABRICACIÓN DE LODO	Una prueba en contenedor	% A<3%
DURANTE EXCAVACION	Pruebas en excavación a diferentes profundidades, con un mínimo de 3 posiciones, en el fondo y dos posiciones intermedias	% A<3%
DESPUES DE COLADO: RECUPERACIÓN DE LODOS	Pruebas en contenedor al regresarlo durante el colado	% A<3%

Cuando el lodo se recupera se sabe de antemano que deberá ser mezclado con lodo nuevo, por lo que se revisa siempre la calidad a diferentes profundidades siendo la parte superficial la primera que se recuperara, la medición arrojará mayores cantidades de arena en el fondo por lo que la medición anterior a diferentes profundidades nos dejara tomar la decisión de cuantos metros cúbicos tienen la calidad necesaria para ser recuperados y reutilizados. Posteriormente se hace de nuevo un sondeo y pruebas que corroborarán o desmentirán la calidad del lodo que se obtuvo durante la etapa de excavación.

En caso de que sea necesarias recuperaciones grandes debido a escasez de agua, bentonita o espacio de almacenamiento se puede recurrir a maquinaria especializada que separa el lodo de las arenas, los desarenadores tienen diferentes capacidades según su tamaño por lo que no es poco común su uso en zonas remotas o de difícil acceso (*Ver fotografía 3.a.i.1*)



Fotografía 3.a.i.1

ii. Viscosidad

La viscosidad nos dice cuando el lodo sigue comportándose como un fluido y es manejable, conforme siga estando en reposo el lodo se ira comportando cada vez más plástico y dejara de ser útil para su fin (servir como un ademe provisional) por lo que se debe de tener especial cuidado en el tiempo de fabricación y suministro a la excavación con mediciones constantes.

La prueba en campo es muy sencilla, se utiliza un cono Marsh y un recipiente estandarizado (de ¼ de Galón) en el que se mide el tiempo en que el fluido tarda en llenar el recipiente al pasar por el cono, la prueba se mide en segundos teniendo como referencia los 26 segundos que tarda el agua común en llenar el vaso graduado.

iii. Peso específico

El peso específico del lodo bentonítico tiene valores máximos dependiendo del tipo de suelo que se esté ademandando, siendo común para arcillas de la ciudad de México un valor cercano de 1.04 kg/cm^2 y hasta los 1.06 kg/cm^2 para arenas, contrario a lo que podría creerse tener pesos específicos demasiado altos no favorece en nada la calidad del colado ya que aunque puede traducirse en un mayor empuje hidrostático (y menos posibilidad de caídos) también se convierte en un fluido pesado que competirá con la densidad del concreto, por lo que a la hora del colado podría representar zonas en donde el lodo queda alojado dentro del concreto fresco.

4.ACERO

4.1 Machi-hembrado en las juntas de los tableros de muro Milán

Las llaves de cortante en el Muro Milán son elementos de liga entre los paneles o franjas en los que se construye el muro, su principal uso es el de transmitir parte de los esfuerzos de panel a panel de manera en que el muro funcione como “un solo elemento”, acompañadas de una trabe de coronamiento y apuntalamiento con vigas mdrinas es que se trata de garantizar dicho comportamiento. El otro uso que resulta ser más importante que el principal es el de complicar el flujo de agua a través de las uniones entre paneles.

Se tienen muchas opciones geométricas para las llaves de cortante pasando desde las figuras trapezoidales, triangulares etc. Hasta las más comúnmente usadas formadas por juntas tubulares con sección circular (*figura 4.1*).

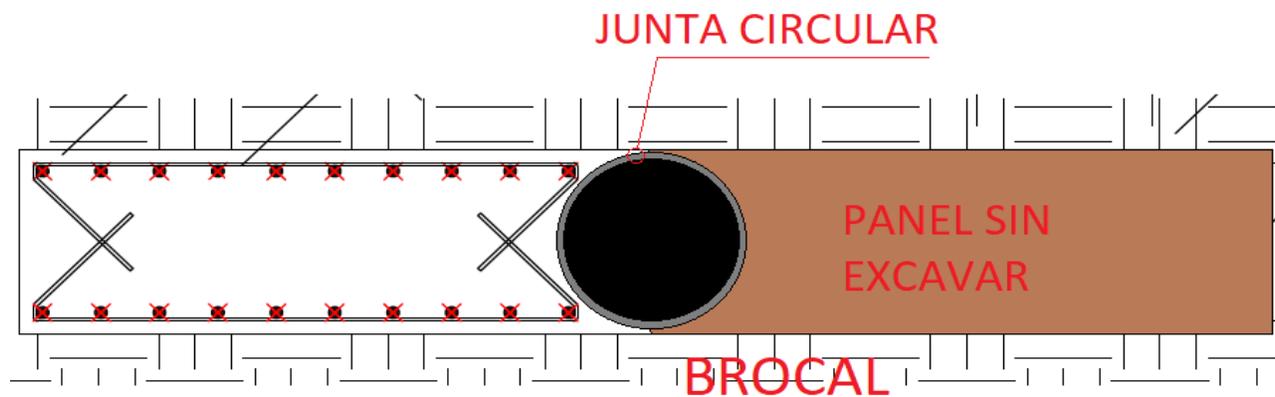


Figura 4.1.1

Otra manera de llamar a las llaves de cortante es con el nombre de “*machi-hembrado*” debido a que los paneles con terminación en protuberancia son llamados coloquialmente “machos” mientras que los paneles con terminado en concavidad son llamados “hembras” (*figura 4.2*).

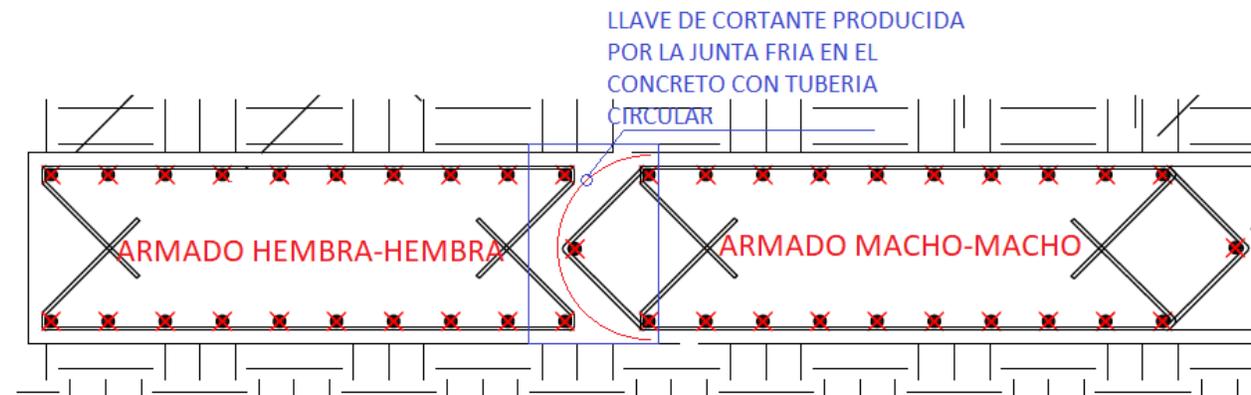


Figura 4.1.2

Como se puede observar en la *Figura 4.2* el acero de refuerzo mantiene su densidad a lo largo del muro y aunque la junta fría que se forma debido a la diferencia de tiempo entre los colados de los paneles colindantes (pueden colarse con diferencia de días) representa un problema de discontinuidad, al usarse algún medio de apuntalamiento que transmita la carga de los troqueles a los paneles de forma uniforme como una “viga madrina” se garantiza un comportamiento “uniforme” con carga distribuida y por tanto esfuerzos en el acero de refuerzo iguales.

Aquí es donde se encuentra el primer problema con el diseño del acero de refuerzo, la *ilustración 4.1 y 2* se refiere a un proyecto real construido en la zona de transición de la Ciudad de México en donde el estructurista diseña el armado con terminación en escuadra, cuando el proyectista no considera la geometría de la llave de cortante provoca que las zonas entre los paneles del Muro Milán no tengan la cantidad de acero necesario estructuralmente, es decir zonas de debilidad.



Ilustración 4.1.1

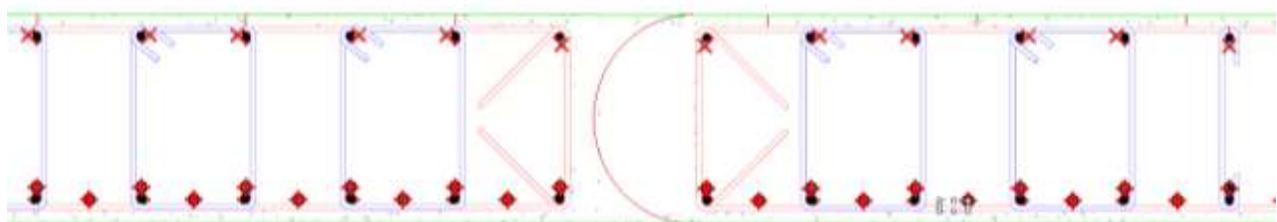


Ilustración 4.1.2

Hay ocasiones en que el muro además de tener la función de soportar las paredes de la excavación tendrá la función de recibir las cargas de la estructura para transmitir las al suelo, cuando es así se diseñan paneles con acero de refuerzo adicional, generalmente en forma de “estribos” y bastones en ambos sentidos. Si tenemos un proyecto con esta condición es cuando toma mayor importancia el

mantener la densidad de acero de refuerzo especialmente en la transición de las franjas normales y las franjas con transmisión de cargas verticales “Muros Pila”.

La solución que se implementó en el proyecto anteriormente mencionado fue: mandar las recomendaciones constructivas al estructurista y obtener de regreso el diseño de los paneles con la geometría necesaria en machimbrado, este último diseño si es factible de construir (*Ilustración 4.3*).

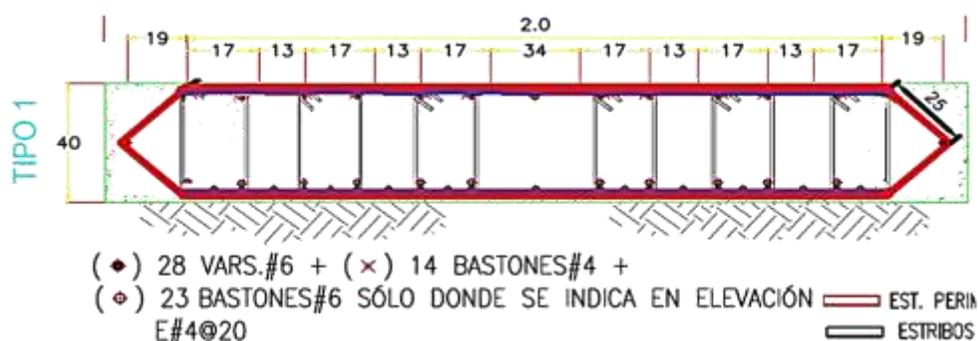


Ilustración 4.1.1

4.2 Distribución del acero para uso de tubería de suministro de concreto

Otro de los aspectos a considerar en el diseño es como será colado el Muro, si el elemento no contiene estribos como refuerzo transversal además de refuerzo perimetral entonces no debemos tomar en cuenta este punto, pero esto no es muy común en la práctica, los estructuristas en la mayoría de las ocasiones buscaran que el Muro Milán tenga la doble función de trabajar estructuralmente para alojar los cajones de estacionamientos subterráneos o sótanos de servicio por lo que diseñan paneles de cargas con estribos y bastones.

Como se ha visto en el procedimiento constructivo el colado de las franjas se realiza con tuberías largas y tiro directo del concreto, debido a la diferencia de cargas entre la tubería y la carga del ademe la tubería debe comenzar con un largo casi igual que la profundidad de excavación con una separación del fondo de entre 0.5 y 1.0 metros. Conforme la altura del concreto sube dentro de la excavación la tubería deberá irse acortando, en caso contrario la carga del ademe impedirá que el concreto siga fluyendo.

De la explicación anterior es de donde surge la importancia de considerar las dimensiones de la tubería Tremie, (siendo la tubería de 8” de diámetro la más común) se necesitará en cada uno de los paneles una zona transversal libre del diámetro de la tubería más 5 centímetros para permitir su libre tránsito.

Del mismo proyecto anteriormente mencionado es que podemos observar que en el primer diseño se consideraban 5 estribos de 20x34 más una grapa de 34 y ningún espacio libre para la tubería de colado (*Ilustración 4.2.1*).

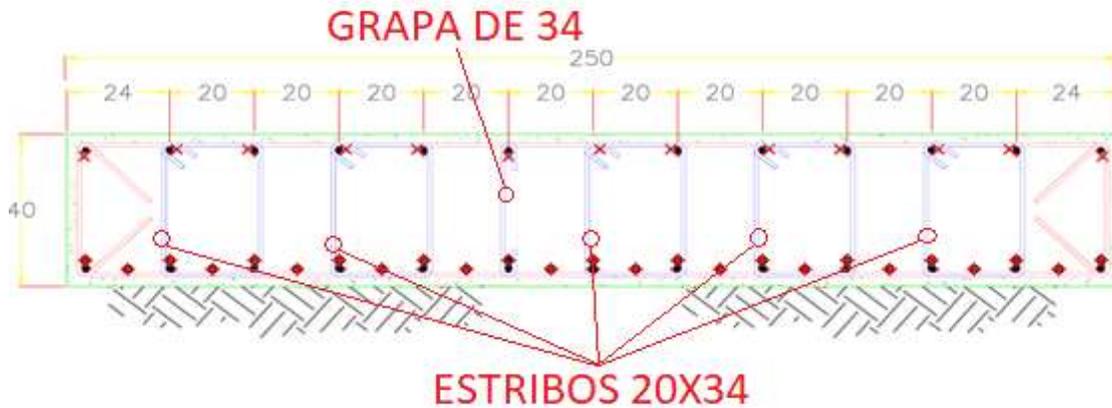


Ilustración 2.2.1

Se requirió de nuevo que el estructurista realizara un cambio en el proyecto estructural en el que se incluyera un claro de 34 cm donde se alojaría la tubería Tremie, el diseño final que ya consideraba el machimbrado también tenía un espacio libre y una re-distribución de los estribos en el que cambiaba el número y su geometría con la finalidad de permitir el colado sin interferir en la resistencia estructural de los “muros pila”, finalmente el plano terminó con 6 estribos más pequeños de 17x34 y se eliminó por completo la grapa (*Ilustración 4.2.2*).



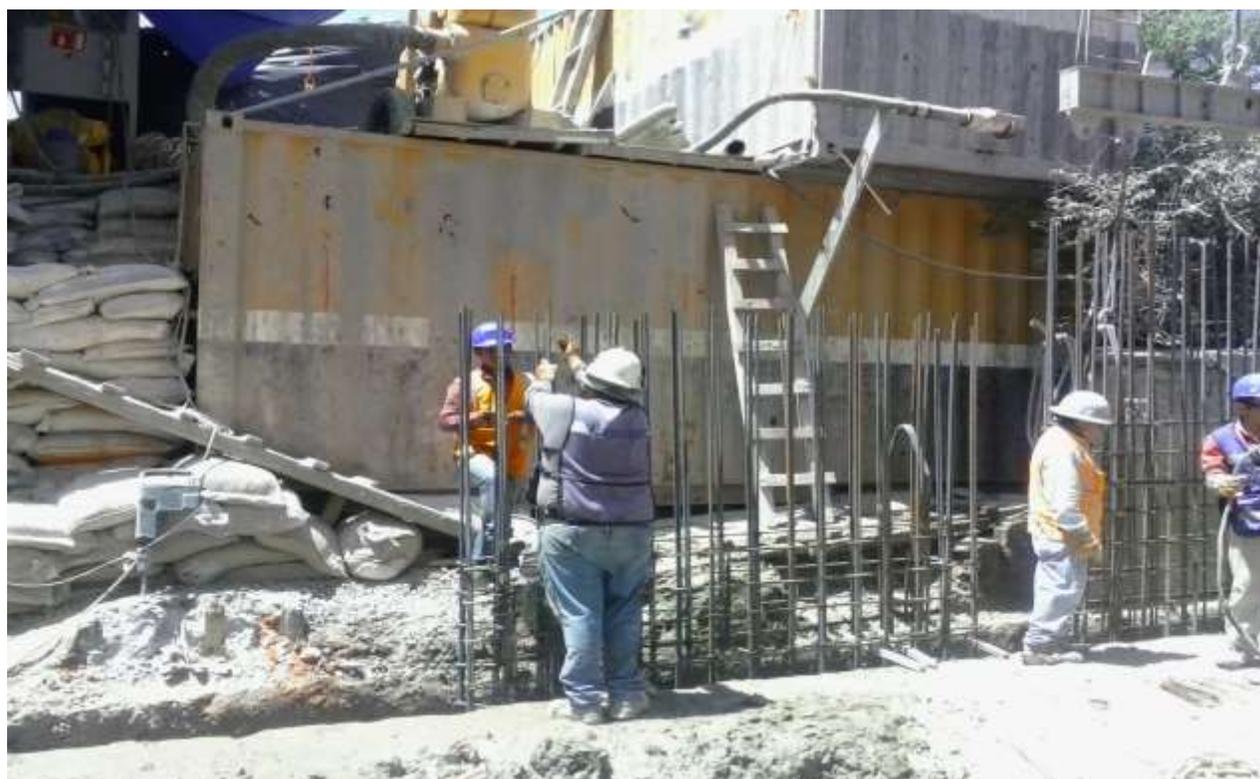
Ilustración 4.2.2

4.3 Elementos de rigidización para el izaje

Cuando se habilita el acero para los muros, las parrillas resultan ser elementos sumamente esbeltos que con esfuerzos pequeños durante el izaje pueden presentar deformaciones importantes que impidan su colocación dentro de la excavación, más aún si el recubrimiento de concreto es menor a los 5 cm en tal caso mantener la geometría de estos elementos es de suma importancia.

Para el diseño de los elementos de rigidización se debe conocer primero el proceso de habilitación y colocado que se lleva a cabo en el campo:

El acero se habilita en parrillas, el largo de las parrillas depende directamente de la apertura de las grúas que se vayan a utilizar teniendo como límite común un largo de 18m para plumas de 60 ft, aunque las grúas de 30ton de pluma sobre orugas (las más comunes en la construcción de muros Milán) tienen una apertura máxima de 20m se necesita un claro libre entre el terreno y la parrilla para poder empatarlas cuando se debe seccionar el armado (*Fotografía 4.3.1*).



Fotografía del empatao de parrillas 4.3.1

En la fotografía uno se puede observar como una parte del armado ya se encuentra colocado dentro de la zanja, y las varillas *sin* refuerzo transversal (aproximadamente de 1m) indican que se colocara otra parrilla para completar el armado en la parte superior, por lo que la grúa deberá garantizar que el armado subsecuente puede levantarse del suelo un mínimo de 2m de manera que se pueda maniobrar para empatar ambos armados para soldarlos.

A la hora de realizar el izaje se colocan dos cables guías independientes entre sí, en el principal se colocará una viga (balancín) que tiene la capacidad de tomar uniformemente la parrilla en la parte superior y darle al mismo tiempo la libertad de colgar y auto nivelarse. El cable secundario estará habilitado con un gancho y dos cables cortos (estrobos) que se unirán a la parrilla con tubos o varillas “atravesadas” en una zona más baja, estos cables tienen la facultad de que la grúa puede liberarlos y permitir que la parrilla se coloque de manera vertical (*Fotografía 4.3.2*).



Fotografía 4.3.2

5.CONCRETO

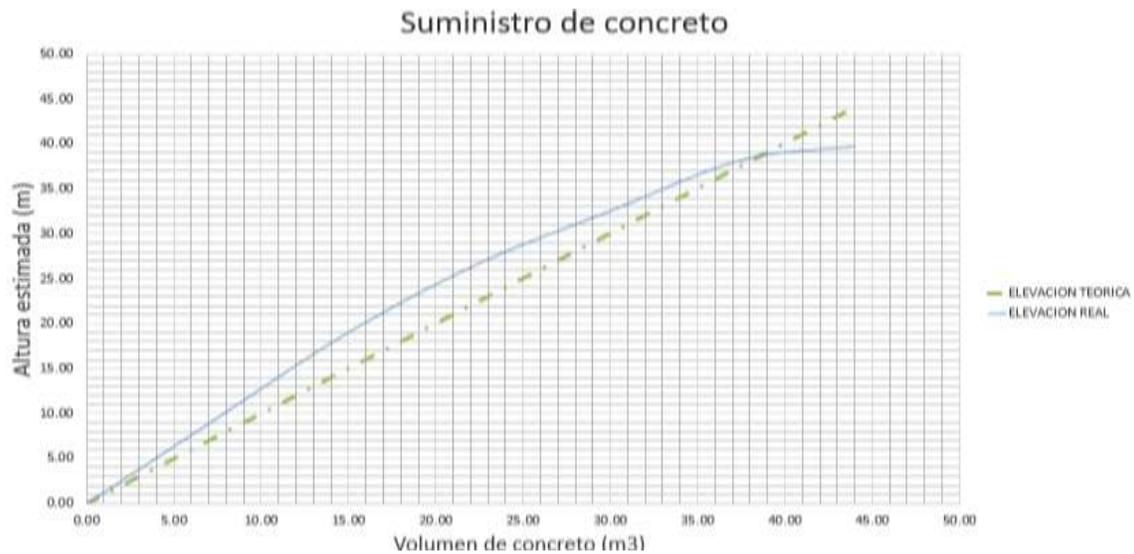
5.1 Control de suministro de concreto

La cantidad de concreto que se suministra en muro Milán está calculada de manera empírica, la experiencia en la Ciudad de México indica que el volumen mínimo es el volumen geométrico más un 10% extra, es decir si el muro es de 50 cm de espesor y el tablero tiene una profundidad de 8m y una longitud de 6m el volumen geométrico será de 24m³, pero con el abudamiento se considera que se requieren como mínimo 26.4 m³. En la práctica se usan graficas que se irán llenando en tiempo real del volumen geométrico o teórico Vs el volumen real. Mediante sondeos continuos de la altura del concreto y las dimensiones del área es como se puede conocer el comportamiento del colado, de esta manera es que se puede llevar el control del volumen requerido para ajustes o la cantidad probable que sobrara. A continuación, vemos un reporte de colado real con la gráfica de volúmenes comparados en tiempo real durante el colado (*Grafica 5.1.1*), en esta grafica podemos observar que la elevación real del concreto estuvo por encima de la elevación teórica esperada por cada unidad mezcladora, también se puede observar que al llegar a una altura aproximada de 38 m (el tablero llega hasta una profundidad de 40m por lo que la cota 0.00 tendrá una altura de concreto de 40m) la elevación real iguala a la teórica y se llega a la cota esperada con un sobre volumen del 10.6%. (*Tabla 5.1.1*)

REPORTE DE COLADO DE MURO MILAN											
NOMBRE DE LA OBRA:		#####									
SECCION:											
No DE MURO: MP31		No DE PLANO				M-2					
LOCALIZACION C/8a		SUMINISTRADO POR:									
FECHA DE COLADO:		11/06/2018				FECHA DE ARMADO:		30/05/2018			
F'c= 350 KG/CM2		RESIS. DE ARMADO: Fy=4,200 KG/CM2				SOLDADURA		SI 13 KG			
AGREGADO: 3/4"		RECUBRIMIENTO: 3.5 CM				PESO TOTAL EN Kg.:		6638.07 KG			
REVENIMIENTO: 18 CM		SOBRE VOLUMEN				SOBRE VOL. %		4.23 10.5 %			
ADITIVOS: NO		VOLUMEN TEORICO: 39.77 M3				VOLUMEN REAL: 44.00 M3					

No	No DE CAMION	F'c=350 Kg/CM2 CLASE I	REV	M3 PARCIAL	M3 ACUMULADO	SALIDA DE PLANTA	LLEGADA OBRA	INICIO VACIADO	FIN VACIADO	ELEVACION TEORICA	ELEVACION REAL
1	CR4203	350	18	7.50	7.50	7:30	8:50	8:55	9:13	-33.07	-31.00
2	CR4279	350	18	7.50	15.00	8:10	9:28	9:31	9:40	-25.97	-21.50
3	CR4292	350	18	7.50	22.50	8:34	10:15	10:20	10:48	-18.07	-13.80
4	CR4297	350	18	7.50	30.00	8:58	10:50	10:55	11:07	-10.97	-6.00
5	CR4203	350	18	7.50	37.50	9:22	10:50	11:17	11:34	-3.07	-2.33
6	CR4279	350	18	7.50	45.00	9:46	11:32	11:42	12:00	3.43	-0.80
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											

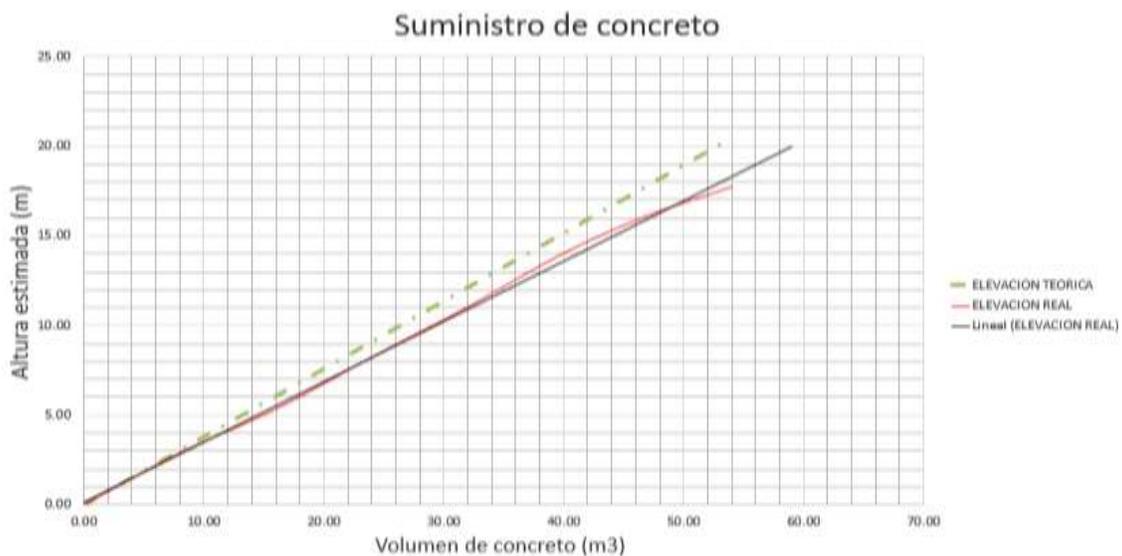
Tabla 5.1.1



Grafica 5.1.1

Este es un caso poco común en que se puede inferir que la excavación no conservo su geometría en la parte central provocando que el concreto subiera más de lo que debería, pero solo se conocerá el motivo cuando se inicien los trabajos de excavación y la zona donde se encuentre ubicado el tablero sea descubierto.

En el siguiente caso más común en la vida practica (**Grafica 5.1.2**) para el mismo proyecto se observa al concreto ir por debajo de la línea teórica y con métodos numéricos se puede inferir (de mantenerse un comportamiento lineal) la cantidad de concreto que será necesario para terminar el colado del tablero.

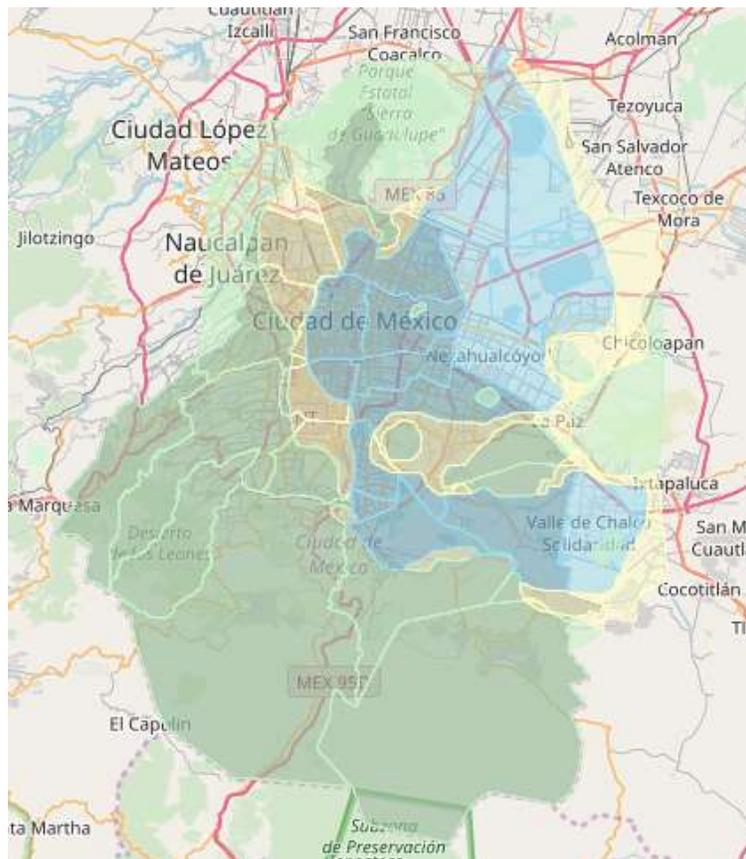


Grafica 5.1.2

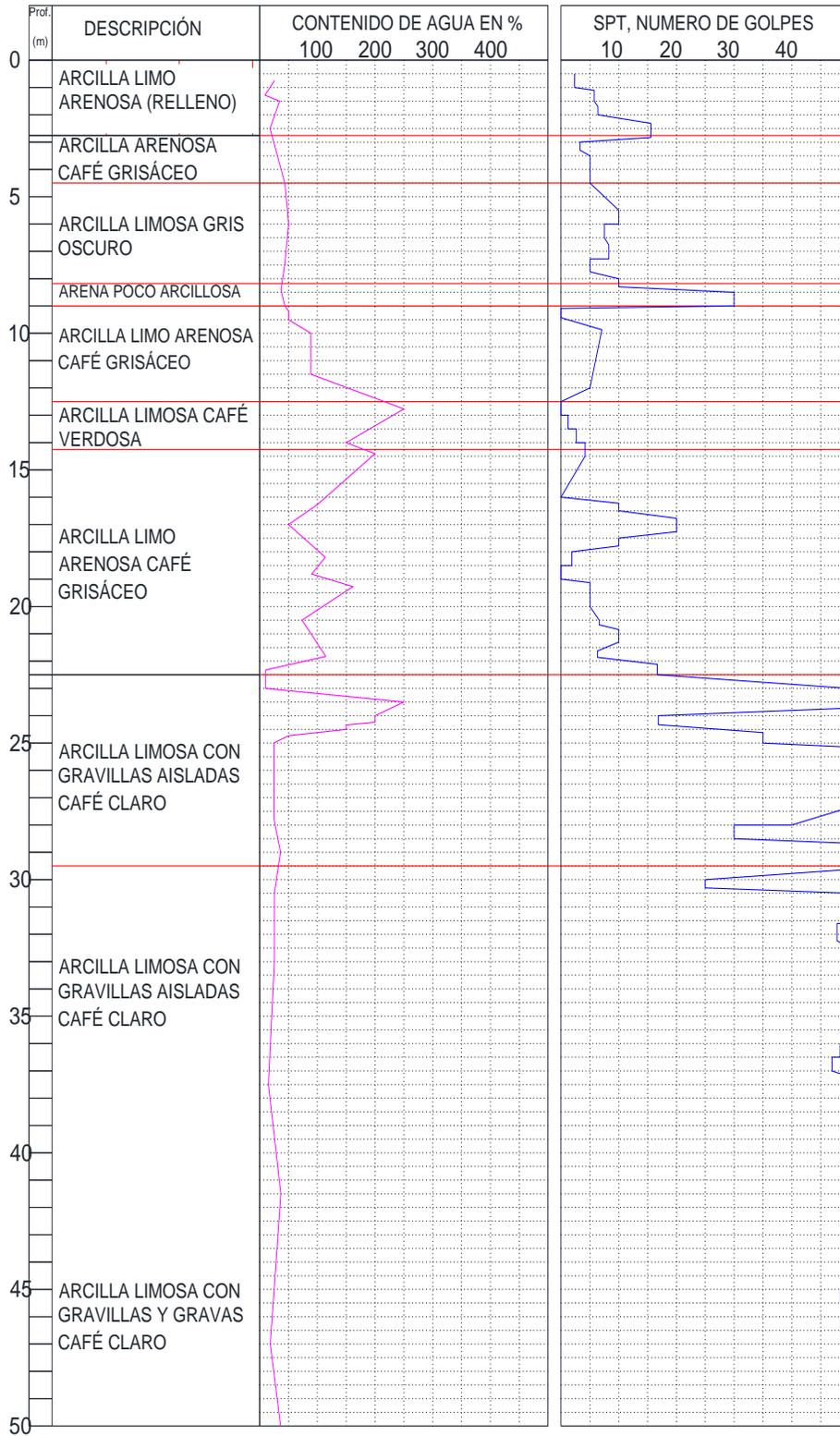
5.2 Correlaciones volumen teórico contra volumen real suministrado

Debido a que es muy empírico el volumen del concreto que se necesario para colado de Muro Milán es que en esta tesis buscare encontrar correlaciones entre el tipo de suelo en los diferentes estratos y los volúmenes de abundamiento de manera que sea posible anticiparse al abundamiento y tener un acercamiento más científico a esta problemática típica de la vida práctica.

El proyecto con el cual se realizará la investigación se encuentra ubicado sobre la Calzada General Mariano Escobedo cercano a la Entidad Mexicana de Acreditación (*Mapa 5.2.1*), en zona geotécnica II (de transición), su estratigrafía fue obtenida mediante dos pozos a cielo abierto además de dos pruebas de penetración estándar con avance mixto (*Perfil 5.2.1*)



Mapa 5.2.1 Zonificación geotécnica, atlas de la ciudad de México, 2018.



Perfil 5.2.1

Tomando los reportes de colado es posible obtener la sobre-suministración y la sub-suministración de concreto en porcentajes a cada profundidad que haya sido sondeada después de que cada mezcladora había terminado el vaciado. En primer lugar, podemos obtener una gráfica completa con todos los datos medidos en el proyecto. El procedimiento para conocer el porcentaje de sub-suministro o el abudamiento es muy sencillo, siguiendo con el mismo reporte de la tabla 5.1.1, hacemos una diferencia porcentual sencilla:

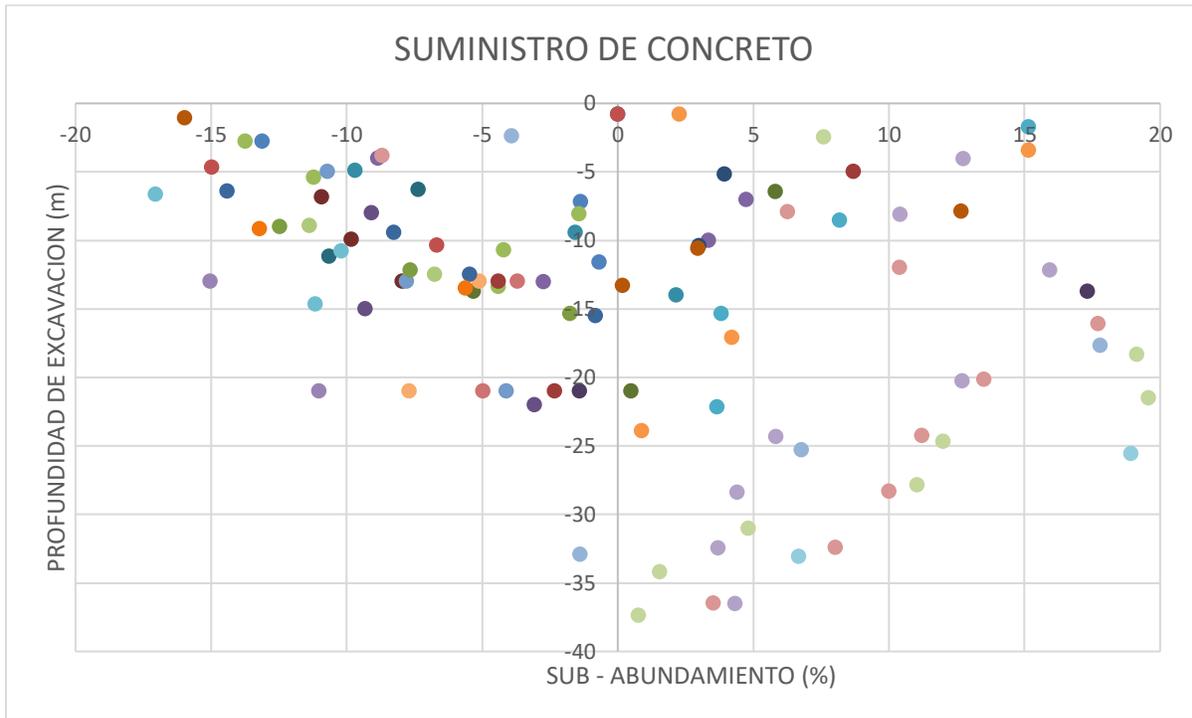
$$Dif \% = \left(\left(\frac{Elev. Teo}{Elev. Real} \right) - 1 \right) * 100 \text{ ----- } ec. (1)$$

M31		Dif %
-33.07	-31.00	6.67
-25.57	-21.5.00	18.93
-18.07	-13.80	30.94
-10.57	-8.00	32.12
-3.07	-2.33	31.75
3.43	-0.80	-528.75

Tabla 5.1.2

Algo notable en esta tabla es que para la última medición la diferencia cambia drásticamente con respecto al valor inmediato anterior, debido a que en el último colado no es posible conocer con certeza la cantidad de concreto que se mezcla con el lodo bentonítico el cual se utiliza para rebosar el colado y garantizar la sanidad del concreto en la superficie es que en la práctica profesional se hace la consideración de que todo el concreto que venía en la última unidad mezcladora sirvió para alcanzar la altura de colado deseada. Más adelante se utilizará esta observación para limpiar los datos.

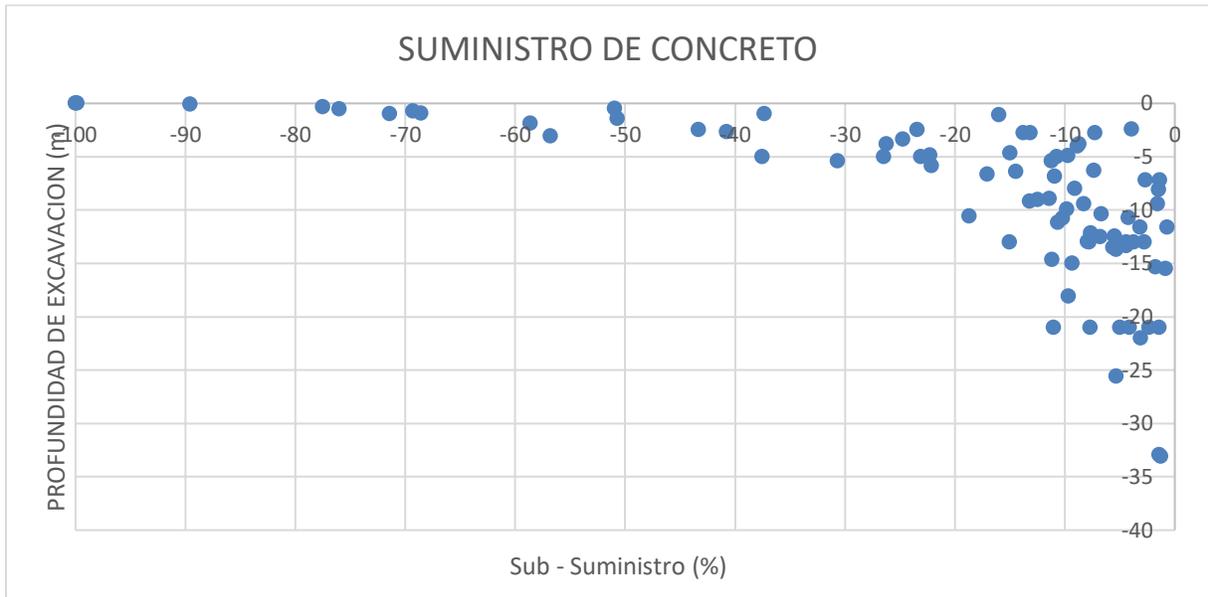
Con todos los datos antes mencionados es posible formar la siguiente Grafica (5.1.3) en la que la dispersión que se puede observar es muy grande con ciertos patrones interesantes.



Grafica 5.1.3

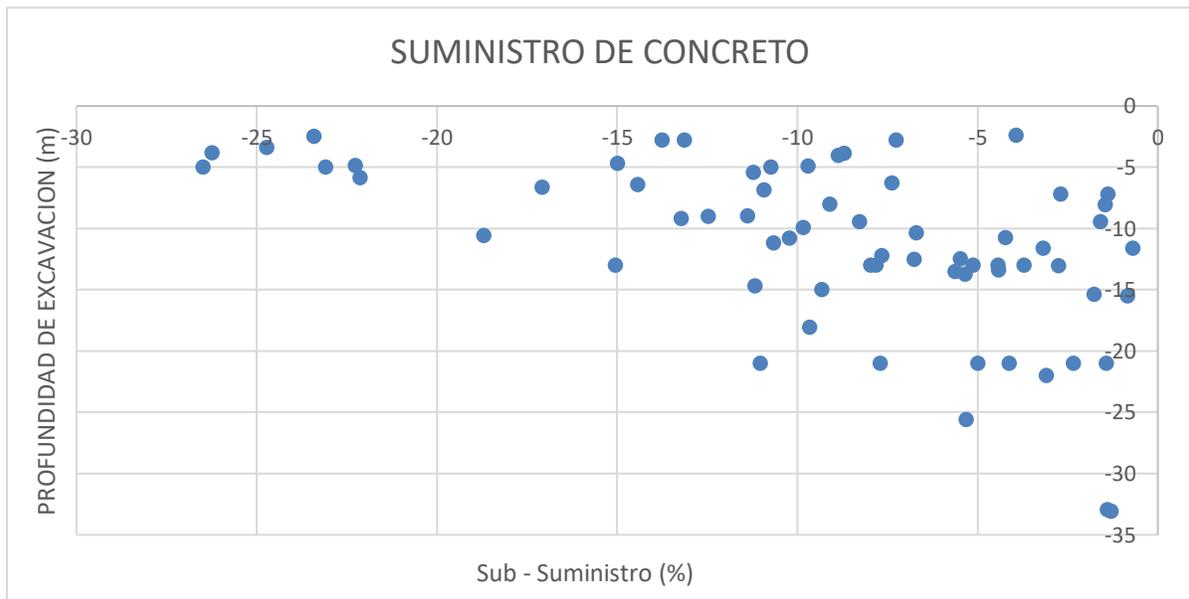
Para obtener los valores útiles en la tesis es que se tiene la necesidad de definir parámetros que limpien los datos, eliminando así puntos que representan errores y que serán de gran impacto para el estudio.

- No se tomarán los valores que representan un abundamiento ya que en esta tesis se busca encontrar una correlación con el sub suministro de concreto, de hecho, el abundamiento es un fenómeno mucho más complejo de estudiar debido a la incapacidad de observar lo que pasa dentro de la excavación, por lo que si eliminamos los valores que tienen un valor de Dif % mayor al 0% obtenemos el comportamiento de los valores de sub-suministro. (**Grafica 5.1.4**)



Grafica 5.1.4

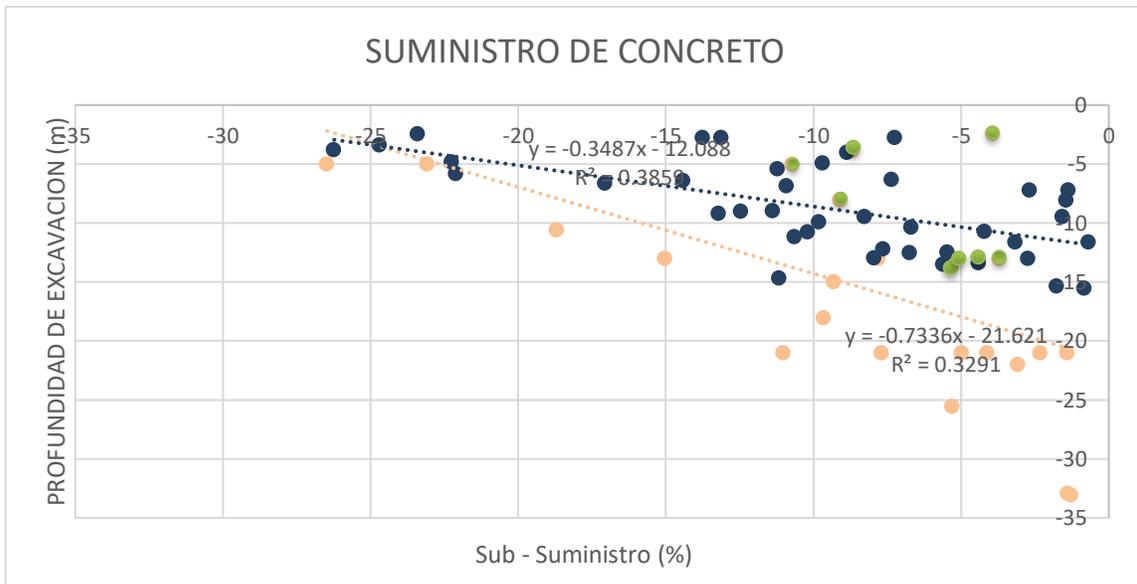
- Los valores cercanos a la superficie que representan un error por si mismos debido a la incapacidad para medir con certeza el concreto “sobrante” también serán eliminados, dejando así solo los valores que están a una profundidad mayor al -1.2m (tamaño del brocal) Grafica 5.1.5



Grafica 5.1.5

- Con esto se puede observar un patrón definido con valores que van desfasados para los tableros en proyecto menores a 18.54 m y aquellos tableros con profundidad mayor a 18.54m.

$$Dif \% = \left(\left(\frac{Elev. Teo}{Elev. Real} \right) - 1 \right) * 100 \text{ ----- } ec. (1)$$



Para el conjunto de datos correspondientes a muros de +0.00 a -40.50 m (color rosa) tenemos una ecuación lineal que se ajusta hasta un valor de determinación igual a 0.3859.

$$Y = -0.3487 x - 12.088 \text{ ----- } ec. (2)$$

Para el conjunto de datos correspondientes a muros de +0.00 a -18.54 m (color azul) tenemos una ecuación lineal que se ajusta hasta un valor de determinación igual a 0.3291.

$$Y = -0.7336 x - 21.621 \text{ ----- } ec. (3)$$

Los puntos verdes son aquellos que corresponden a tableros menores a 16.04 m de profundidad, debido a que no se encuentran datos suficientes cercanos a la superficie es que no se consideran para el estudio, aunque se podría esperar que su comportamiento termine siendo similar al de los otros dos tipos de tableros ya que comparte en el segmento de -16.04 m a -5.00m la misma distribución.

Se puede observar en los ajustes lineales que el aumento de carga por columna de concreto no influye en los tableros de mayores a 18.54m ya que ambos tipos de tableros tienden a acumular el mismo porcentaje de sub-suministro en la parte superior de la excavación (cercano al 25%), en palabras simples, el suelo parece no sufrir deformaciones volumétricas adicionales por el empuje horizontal que ejerce la columna de concreto y se va compensando hasta alcanzar el volumen de concreto adicional cercano al 25%, debido a que es acumulativa y además lineal es que con una simple ecuación se puede conocer la cantidad de sobre volumen, a cualquier profundidad (ecuación 4)

$$\% + V = \frac{\% \text{ Max. Tendencia (25\%)}}{\text{Profundidad}} \text{ ----- } ec. (4)$$

Para los muros de -18.54 m de profundidad el aumento de volumen es de 1.34%, mientras que para los muros que llegan hasta una profundidad de -40.54 m el aumento de volumen por metro de profundidad es de 0.61%

Debido a que la forma de medir el suministro de concreto es volumétrica se puede hacer una relación directa entre el sub-suministro y el aumento de volumen de la excavación, con lo que, para 33 excavaciones, a diferentes profundidades, con diferentes geometrías se obtiene siempre la convergencia a un valor de 23 a 27% en el aumento de volumen de excavación debido a la carga del concreto y a la compresibilidad de la arcilla.

En otra construcción de muro Milán correspondiente a la zona de lago, sobre Eugenia (eje 5 sur) esquina con División del Norte, se registraron para 20 tableros un promedio de sobre-abundamiento del 15% por lo que se puede ver claramente la influencia de la zonificación geotécnica al compararla con el proyecto anteriormente mencionado.

6.CONCLUSIONES

- Las consideraciones técnicas del procedimiento constructivo causan un gran impacto en el diseño estructural por lo que el desconocimiento de las mismas se traducirá en diseños ineficientes o inconstruibles.
- La calidad de construcción de muros pantalla, en especial del muro Milán está fundamentada en la correcta ejecución de los pasos que conforman el procedimiento constructivo, en especial del cuidado que se tenga en la fabricación de ademes líquidos y los tiempos entre la fabricación y su suministro.
- El acero de refuerzo debe ser diseñado tomando en cuenta capacidad máxima de izaje de equipo, tubería de suministro de concreto, machi-hembrado y elementos de rigidización para evitar deformaciones durante el izaje y colocación.
- Aunque los datos correspondientes a 33 tableros de diferentes profundidades con diferentes dimensiones tienen una clara convergencia hacia un sobre-volumen del 25%, no se puede concluir que para todas las excavaciones de muro Milán de la zona de transición se tendrá que considerar este porcentaje para el suministro de concreto, serán necesarios más proyectos en esta zona para tener resultados concluyentes.
- El sobre-volumen está fuertemente ligado a la zona geotécnica, ya que por proyecto se encuentra un valor promedio de sobre-volumen.
- Es necesaria la documentación de muchos proyectos más para concluir la correlación entre sobre-volumen de excavación y zonificación geotécnica.

REFERENCIAS

Bibliográficas

SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS, Manual de Construcción Geotécnica. Tomo I y II, 2002.

SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERIA GEOTECNICA, Ingeniería de Cimentaciones Profundas, 2018.

G. A. LEONARDO, Foundation engineering, Mc Graw Hill, 1962.

Digitales

<http://www.atlas.cdmx.gob.mx/geotecnia.html>, consulta agosto de 2018.

https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/marsh_funnel.aspx, cono Schulmberger, consulta Agosto de 2018