

DISEÑOS BÁSICOS PARA UNA ESTACION DE BOMBEO DE GRAN CAPACIDAD EN BOGOTA

Jorge Alberto Rodríguez, IC, MSCE, PhD, Jefe Área de Geotecnia

Gustavo Ramírez, IC Área de Estructuras - Medellín

H -MV Ingenieros Ltda.

1. INTRODUCCION

Se presenta en este artículo un resumen de los criterios de diseño geotécnico y estructural de la estación de bombeo de aguas residuales del Tunjuelo, El diseño tiene como particular interés el hecho de ser una excavación a cielo abierto de gran magnitud en suelos arcillosos blandos, donde la interacción suelo-estructura juega un papel determinante en el diseño. Estos análisis y diseños han sido realizados por la firma H-MV Ingenieros Limitada, antes HIDROESTUDIOS S.A para el Acueducto de Bogotá.

Como parte de la Actualización del Plan Maestro de alcantarillado de la cuenca del Fucha, el Acueducto de Bogotá consideró el diseño del interceptor Fucha desde la avenida Boyacá hasta el río Bogotá, el cual también recogerá las aguas residuales de la cuenca del Tintal. Posteriormente este interceptor del Fucha llega hasta la zona de la desembocadura del Río Tunjuelo en el río Bogotá, donde también llega el interceptor izquierdo del Río Tunjuelo. Las aguas residuales de estos dos interceptores se deben elevar, en primera instancia para entregarlas al río Bogotá y posteriormente a otra conducción que las lleve a una planta de tratamiento de aguas residuales. Estos colectores llegan aproximadamente a la cota 2525 mientras que la superficie general del terreno en el área está a la cota 2540, por lo que se deberá hacer una excavación del orden de 15 m de profundidad, en una gran extensión para la construcción de la estación.

Las principales características de la planta se describen a continuación:

- El área general para la localización de la estructura de la estación como tal tiene, una longitud total de 220 m y un ancho de 77 m y se encuentra conformando un nivel general inicial de excavación al nivel 2.536 msnm. Esta área está bordeada por taludes con una altura de 5 m e inclinación 2H: 1V, llegando al nivel 2.541 msnm en la parte alta del talud, que corresponde a un metro por encima del nivel general de toda el área del proyecto, en donde se planea hacer un relleno para depositar parte de los materiales de excavación. Alrededor del área de relleno se harán jarillones de altura similar a la de los jarillones del río existentes.
- La estructura de la estación de bombeo tiene una longitud de 166,22 m y un ancho de 32,20 m con una orientación principal NS, por lo cual, se estableció una configuración simétrica respecto al eje EW. Adicionalmente, de la estación de bombeo parte hacia

el río Tunjuelo un canal de desagüe de 16,5 m de ancho. Se contempla que un tramo de este canal esté tapado, y que esta estructura de tapa sirva de acceso a la estación por la parte alta, al nivel 2544,46, en donde se inicia el desarrollo de el canal. Simétricamente a este canal se localizan las estructuras que facilitarán la futura conexión de la estación con la conducción de la planta de tratamiento proyectada.

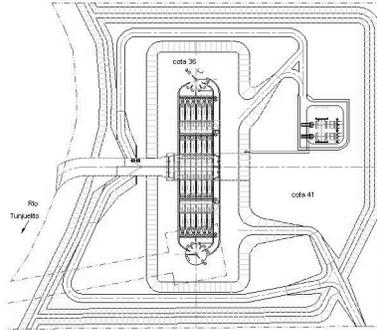


Figura 1 - Vista general del área de la estación

- Básicamente la estación elevadora está compuesta por veinticuatro (24) unidades de bombeo de tornillo distribuidas respecto a un eje longitudinal central con dos niveles de bombeo. Los tornillos serán de tipo helicoidal con una sección transversal de diámetro equivalente de 3,80 m, y del orden de 4 metros cúbicos de capacidad cada una. Tendrán una inclinación de 38°. Cada batería de tornillos estará compuesta por 6 tornillos helicoidales, separados longitudinalmente entre ejes 5,20 m. El primer nivel de tornillos se localiza entre las cotas 2.524,51 y 2.534,7 msnm, mientras que el segundo nivel de tornillos entre las cotas 2.532,32 msnm y la cota 2.542,48 msnm.
- El agua de los interceptores (río Bogotá-Fucha Tunjuelo y Tunjuelo bajo) son recibidas en unos pozos de recepción de diámetro interno $\phi = 20$ m que se utilizan como pozo de construcción de los interceptores y a la vez se utilizan como cámara receptora y de control. Cada pozo está conformado por un muro pantalla perimetral, diseñado bajo el criterio de estructuras en arco. Las dos cámaras estarán conectadas empleando el principio de vasos comunicantes a través de un canal por el costado occidental de la planta.
- El canal comunicante se encuentra enmarcado entre dos muros pantallas longitudinales. Este canal está desarrollado en dos niveles, de acuerdo con los niveles de los tornillos: uno en la parte inferior del primer nivel de tornillos y otro en la parte superior de este mismo nivel de tornillos. Este sistema de vasos comunicantes entre los lados opuestos de los pozos de bombeo permite flexibilidad en la operación y mantenimiento de la planta.
- En la parte alta de los dos niveles de tornillos se construirán estructuras de dos pisos a manera de bodega donde se alojan los motores de los tornillos. En su parte superior estas estructuras tienen un puente grúa para servicio de los motores y cada una de estas casetas tiene acceso vehicular lateral. En su parte inferior se localiza el canal de descarga de los tornillos, que conduce el agua bombeada a la base del siguiente nivel de tornillos o al canal de descarga de la estación.

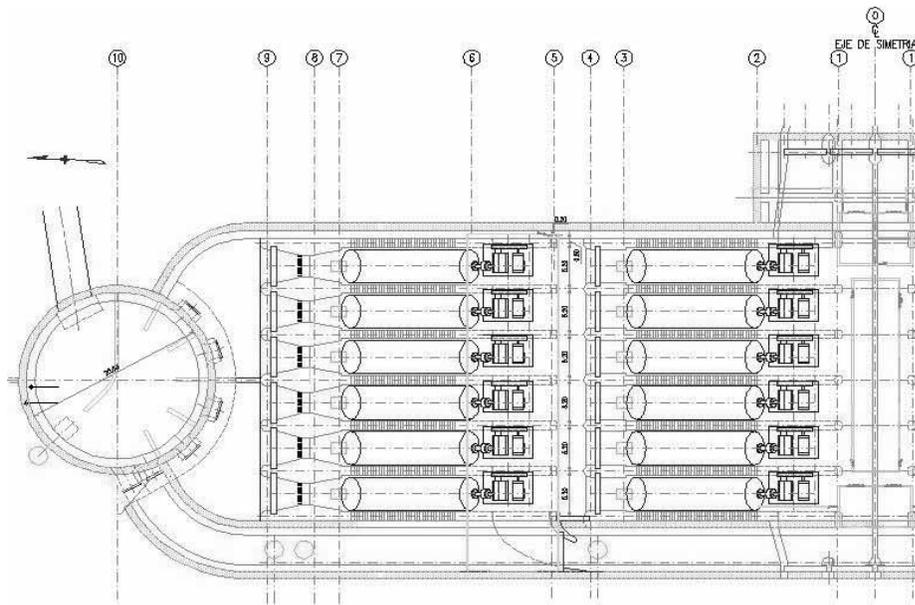


Figura 2 – Vista en planta de la mitad de la estación de bombeo

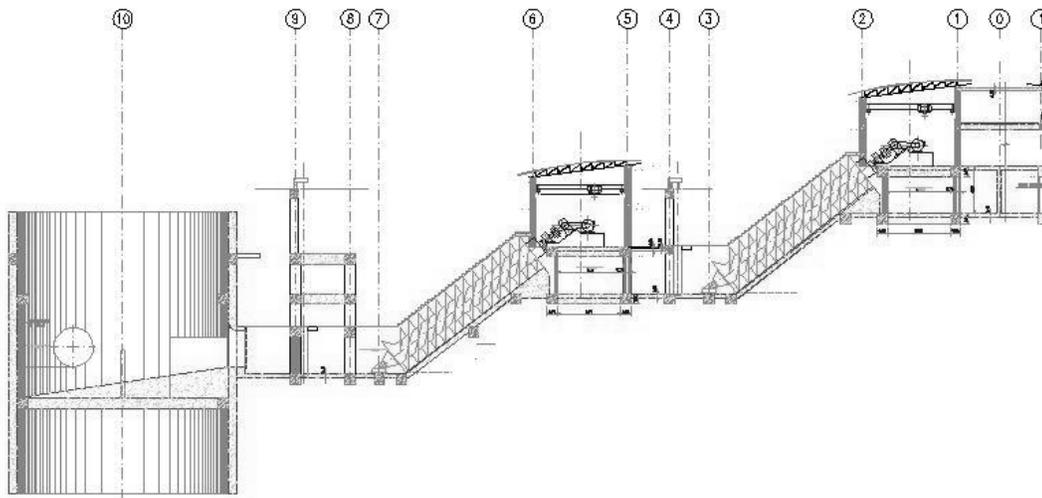


Figura 3 – Vista en corte de la mitad de la estación de bombeo

Los estudios básicos necesarios de la estación de bombeo el Tunjuelo, incluyeron la definición de las dimensiones, las cotas de solera y descarga y el tamaño y cantidad de los elementos mecánicos de bombeo. Adicionalmente se definieron los ejes de estructuras que tendrán en cuenta la operación de la estación, la distribución en planta, los accesos, patios de maniobras y operación, patio de la subestación, cerramientos y protecciones y demás elementos necesarios para definir totalmente la localización de la

estación de bombeo. Todo esto de acuerdo con los diseños básicos realizados tanto hidráulicos, como geotécnicos, junto con los trabajos de campo de topografía, la definición predial y la línea base ambiental del proyecto.

2. ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Con el fin de desarrollar el estudio geotécnico para la estación, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Revisión de la información geotécnica existente, proveniente de la fase de exploración del subsuelo en el área del proyecto y de los resultados de laboratorio efectuados sobre las muestras extraídas en la ejecución de los sondeos. Adicionalmente, se empleó la información proveniente del estudio geotécnico para el interceptor río Bogotá - Fucha –Tunjuelo, (HMV Ingenieros Ltda, 2003, TECN-968-001-IF-GE)
- Caracterización geotécnica para los diseños y definición de los estratos que conforman el subsuelo con base en propiedades de resistencia y deformación.
- Determinación de las secciones a analizar y los elementos a tener en cuenta en el estudio.
- Elaboración de los modelos de elementos finitos longitudinal y transversal de la estación de bombeo.
- Estudio del comportamiento esfuerzo-deformación durante y al final de la construcción de la estación elevadora
- Estudio del comportamiento esfuerzo-deformación a largo plazo (para un período de 30 años), bajo condiciones de operación de la estación de bombeo.
- Análisis de resultados y definición de parámetros para los análisis estructurales.
- Conclusiones y recomendaciones generales.

En el área de la estación de bombeo del Tunjuelo se efectuaron nueve sondeos mecánicos en un área de influencia de 200 m, los cuáles alcanzaron individualmente profundidades entre 20 y 40 m, una prueba de penetración de cono estático (CPT) de 25 m de profundidad con mediciones cada 0,25 m, una prueba down-hole de 30 m de profundidad con mediciones cada 1,0 m y una prueba de dilatómetro con mediciones cada 0,25 m. Durante la exploración se tomaron muestras tanto remoldeadas como inalteradas, para la realización de ensayos de laboratorio para obtener las propiedades índice (humedad natural, límites de consistencia, peso unitario), de resistencia (compresión confinada y triaxial estático consolidado no drenado con medición de presión de poros), y de deformabilidad volumétrica (consolidación unidimensional).

Con el fin de determinar las propiedades geotécnicas de las capas que conforman el subsuelo, se realizó su caracterización, teniendo en cuenta la identificación visual, los resultados de las pruebas in-situ y de los ensayos de laboratorio. Estos resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1 Definición de capas y parámetros de suelos

Profundidad M	Limite Líquido (%)	Indice de Plasticidad (%)	Valor medio de humedad natural (%)	Valor medio de cu kN/m²	Esfuerzo de pre- consolidación (kPa)
0,00 – 6,00	60	25	40%	50	250
6,00 – 14,00	100	50	80%	32	200
14,00 – 20,00	140	72	90%	32	200
20,00 – 24,00	140	90	110%	32 a 40	175
24,00 – 30,00	125	75	90 %	32 a 40	120
> 30,00	150	129	95%	32 a 40	RSC =1.0 aprox.

La distribución del peso unitario total con la profundidad muestra que no existe una desviación significativa de un valor medio de 14 kN/m³, con excepción de los primeros 5,0 m de subsuelo en los que el peso unitario total oscila alrededor de un valor medio de 19 kN/m³.

Con relación a la resistencia no drenada de los suelos del área se reunieron los resultados obtenidos de las pruebas de compresión inconfiada, veleta de campo y veleta de laboratorio, se revisó su variación en profundidad en cada uno de los sondeos y de la comparación entre ellos se determinó su oscilación espacial a nivel local hacia el interior de la estación de bombeo. La variación de los esfuerzos totales y efectivos verticales se estudió en relación con el esfuerzo de preconsolidación, obtenido a partir de los resultados de los ensayos de consolidación efectuados para el estudio geotécnico del interceptor río Bogotá-Fucha-Tunjuelo.

Para estudiar las excavaciones necesarias para la estación de bombas se hicieron análisis utilizando un modelo de suelo que tiene en cuenta el comportamiento plástico del mismo, denominado "hardening soil" (HS), o modelo de endurecimiento plástico del suelo, desarrollado por Schanz et al (1999). Este es un modelo avanzado para representar el comportamiento de diferentes tipos de suelos tanto blandos como duros.

El modelo tiene en cuenta la compresibilidad del esqueleto del suelo y la permeabilidad de manera que puede hacer análisis en condición no drenada en la que se generan presiones de poros debido a los cambios de volumen del suelo y posteriormente se pueden hacer análisis de consolidación en los que se modela la variación de las presiones de poros con el tiempo. Como el modelo tiene una superficie de fluencia, tiene memoria de la secuencias de carga y requiere de las condiciones iniciales de esfuerzos así como de la presión de preconsolidación que define la posición inicial de la superficie de fluencia. Los procesos de descarga se modelan con módulos de deformación elásticos

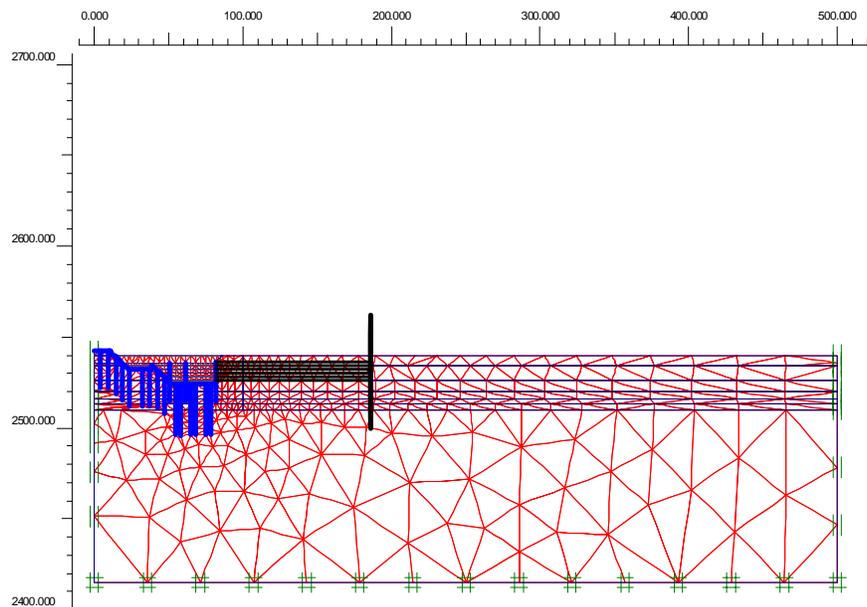
de descarga. Teniendo en cuenta las características, el modelo HS se constituye en un modelo general completo para representar el comportamiento de los suelos.

Los parámetros que se requieren para el modelo se obtuvieron a partir de ensayos de compresión triaxial (curvas esfuerzo deformación hiperbólicas y parámetros de resistencia), y de ensayos de consolidación. Adicionalmente se utilizaron los datos de los ensayos de campo de Down Hole, CPT y dilatómetro, para caracterizar el perfil del terreno y definir los estratos de propiedades de resistencia, deformabilidad y preconsolidación adecuados para los análisis. (HVM Ingenieros Ltda., 2003 - INDS-968-001-EB-GE)

Para llevar a cabo los análisis geotécnicos se desarrollaron modelos de elementos finitos empleando el programa PLAXIS V7.2. (www.plaxis.nl) Este es un programa que permite la simulación de etapas constructivas, la interacción suelo-estructura, redes de flujo, análisis de consolidación y análisis dinámicos, utilizando modelos de plasticidad de suelos completos.

Para los análisis se elaboraron tres (3) mallas de elementos finitos, las cuales se ilustran a continuación:

- FEM1: modelo simétrico longitudinal 2D (eje N-S de la estación de bombeo).



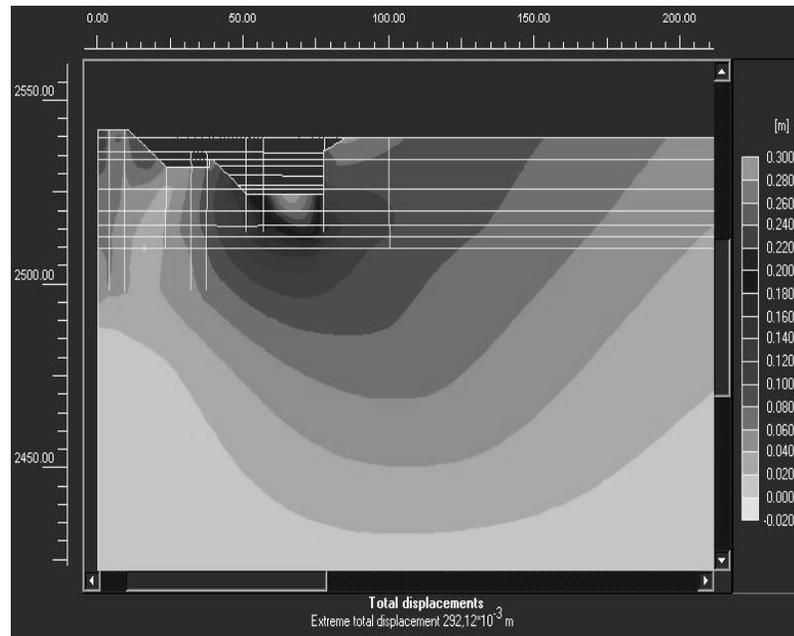
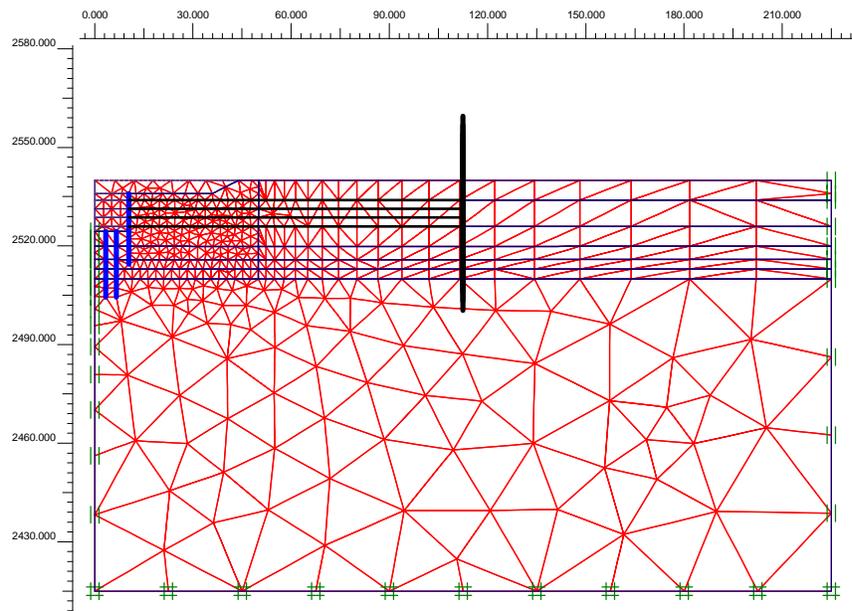


Figura 4 - Modelo simétrico longitudinal 2D (eje N-S de la estación de bombeo). Malla de elementos finitos y ejemplo de resultados de deformaciones a largo plazo

- FEM2: modelo axisimétrico de la cámara de recepción.



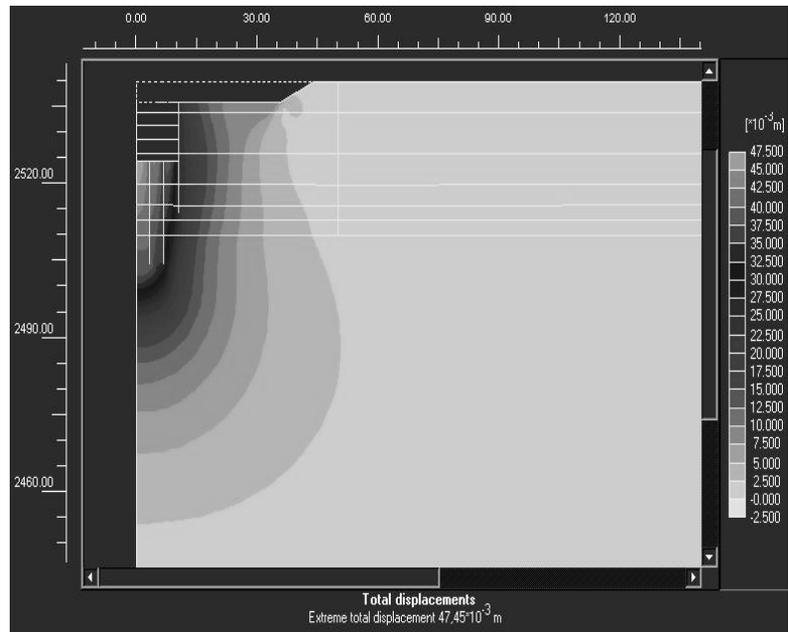
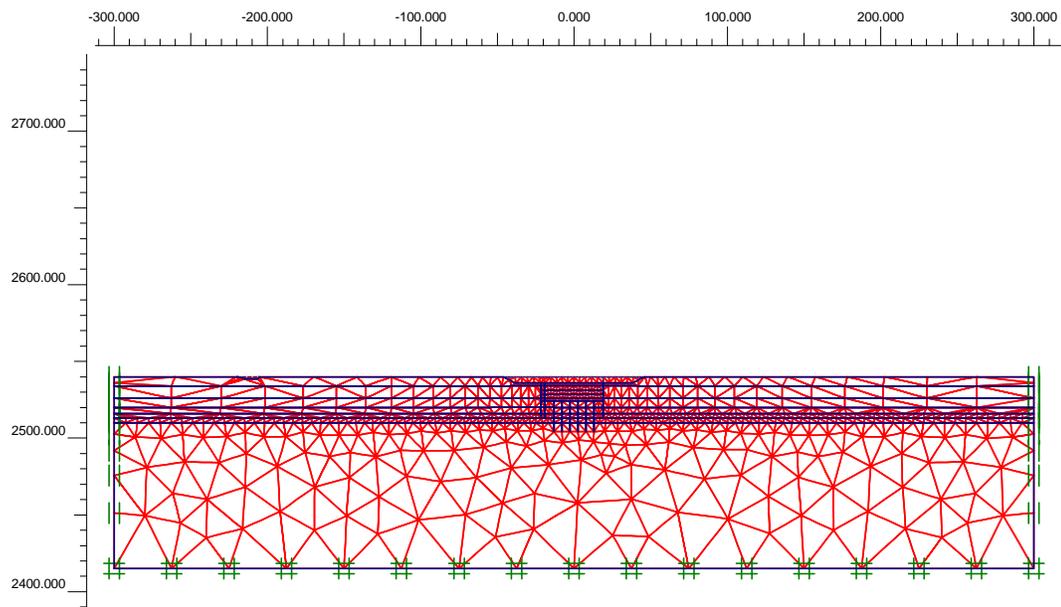


Figura 5 -: Modelo axisimétrico de la cámara de recepción. Malla de elementos finitos y ejemplo de resultados de deformaciones a largo plazo

- FEM3: modelo transversal 2D (eje E-W de la estación de bombeo).



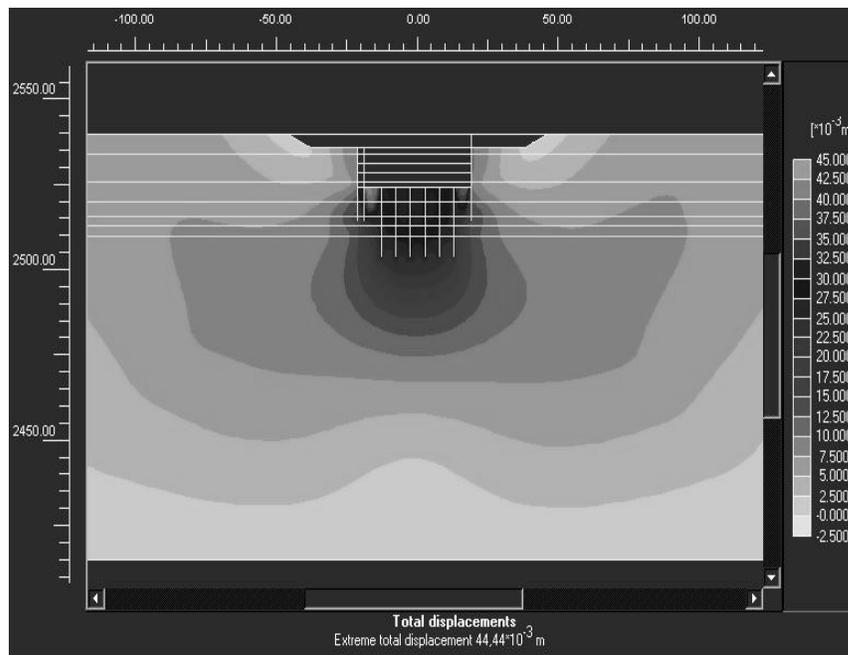


Figura 6 - Modelo transversal 2D (eje E-W de la estación de bombeo). Malla de elementos finitos y ejemplo de resultados de deformaciones a largo plazo

Los elementos estructurales de la estación elevadora se simularon a través del uso de elementos viga. Dado que se empleó un modelo bidimensional de deformación plana, para los elementos no continuos como pilotes, se consideró en el modelo el espaciamiento típico entre los pilotes, para simular estos elementos. Las reacciones calculadas en los análisis por unidad de ancho se toman con un número equivalente de pilotes para la etapa de análisis estructural y diseño.

Para cada uno de los modelos se determinó el estado de esfuerzos geostáticos inicial. Para la modelación del proceso constructivo, para cada modelo se implementaron las siguientes fases de análisis:

- Excavación inicial entre las cotas 2.540 msnm y 2.536 msnm, configurando taludes 2H:1V y para el modelo longitudinal un talud de inclinación de 38° que representa el talud para la instalación del segundo nivel de tornillos.
- Instalación de pilotes y muros de contención.
- Instalación de elementos de apuntalamiento
- Excavación en etapas de acuerdo con el proceso previsto de apuntalamiento
- Instalación de placas de piso.

- Análisis de deformaciones en un lapso de 30 años (consolidación).

Adicional a lo anterior, se realizó un análisis de respuesta dinámica empleando el sismo de Loma Prieta – Estación Corralitos, escalado a 0,20 g y correspondiente a un sismo de fuente cercana. En este caso, el modelo fue modificado con el fin de considerar la profundidad probable de roca. Esta se estimó con base en la “Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá”, (Decreto 074 de enero 30 de 2001), en 180 m.

Los modelos se utilizaron para evaluar a corto y largo plazo los esfuerzos y deformaciones debidos a las excavaciones para la planta y su efecto sobre los elementos estructurales. De los análisis se obtuvieron los diagramas de empujes y los coeficientes de reacción del suelo que se utilizaron para los análisis estructurales detallados tridimensionales para la estación.

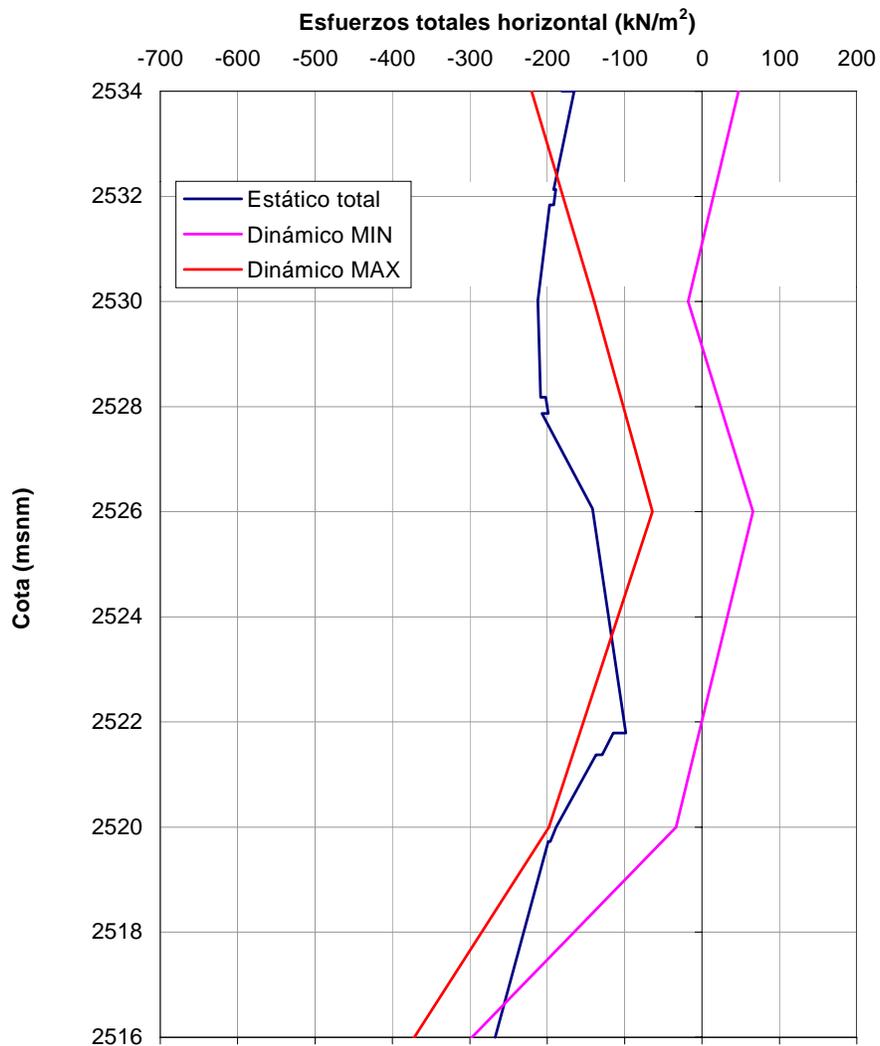


Figura 7 Diagramas de empujes obtenidos para análisis estructural.

El criterio de diseño para las cimentaciones fue el de controlar las expansiones del terreno debidas a las excavaciones de gran profundidad para evitar movimientos diferenciales entre los elementos de la estación ya que estos pueden afectar el funcionamiento de los tornillos y producir daños en las estructuras. Para esto se ha planteado el uso de pilotes reforzados profundos cuya longitud y cantidad se definió con base en los resultados de los análisis. Estos pilotes toman carga en la medida que el suelo trata de expandirse de manera que los pilotes controlan el movimiento. Por lo tanto son pilotes que trabajan con cargas de tracción, diseñados para 60 ton de carga de trabajo y 130 ton de carga última. Las cargas de la estación (equipos, carga viva y carga muerta) son tomadas también por medio de pilotes. Estas cargas de compresión aliviarán en parte las cargas de tracción en algunos de los pilotes. La capacidad de trabajo por carga axial de compresión de los pilotes es también de 60 ton.

Para sostener los empujes de tierras se trató en la medida de lo posible de utilizar pantallas pre-excavadas y fundidas en el sitio en arreglos circulares o en arco, de manera que las cargas de empujes de suelos sean sostenidas por el efecto de arco que produce cargas circunferenciales de compresión en las pantallas. Esta es la forma más eficiente de sostener estos empujes del terreno.

Para los tramos rectos de pantalla se definieron los empujes totales del terreno y cargas en los elementos de apuntalamiento para tenerlos en cuenta en los análisis estructurales. En este sentido se debe tener en cuenta que para los análisis estructurales es necesario aplicar diagramas de presiones o empujes de tierras y agua, mientras que los análisis de interacción suelo estructura consideran directamente la acción del terreno (empujes y deformaciones) y las reacciones de los elementos estructurales los cuales se deforman y consecuentemente adquieren una condición de esfuerzos. De los análisis estructurales se obtienen también deformaciones y esfuerzos, los cuales se deben comparar y verificar que sean compatibles con los resultados de los estudios de interacción suelo-estructura.

Se debe tener en cuenta que las cargas que se apliquen en el análisis estructural tienen que ser cargas que el terreno aplique a la estructura antes de que esta se deforme. Por lo tanto los análisis de interacción suelo-estructura tienen dos componentes. Uno para determinar las cargas compatibles que se deben aplicar a los modelos estructurales, en los que se restringe la deformación de los elementos estructurales mediante apoyos adicionales y otra en la que se consideran las condiciones reales de apoyo y que permite obtener las deformaciones y esfuerzos de los elementos estructurales.

Estas dos etapas se hacen necesarias por la limitación de los modelos utilizados para poder representar la estructura y la interacción suelo-estructura. Por una parte los modelos de interacción suelo estructura (Plaxis) son bidimensionales y no permiten modelar tridimensionalmente el problema excepto para una condición axisimétrica. Por otra parte los modelos estructurales tridimensionales (SAP2000), no permiten modelar la interacción suelo estructura, excepto por medio de apoyos elásticos y cargas equivalentes, y tienen limitaciones para modelar las secuencias de construcción, que son muy importantes para definir la respuesta real de la estructura.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta en los análisis de interacción suelo estructura es el de la selección de los coeficientes de reacción de la subrasante. Estos por definición corresponden a la deformación por unidad de carga en un apoyo tipo resorte. Los

análisis de interacción suelo – estructura permiten calcular el valor de estos coeficientes. Sin embargo estos valores se deben definir con cuidado pues dependen de la magnitud de las cargas y deformaciones del suelo, los cuales a su vez varían con el proceso de construcción, y localmente en diferentes partes del modelo.

3. DISEÑO ESTRUCTURAL BÁSICO

En esta sección se presenta un resumen de la memoria del diseño estructural básico de la estación elevadora del Tunjuelo, (HVM Ingenieros Ltda., 2003, INDS-968-001-EB-GN-ES). El propósito del diseño estructural básico de la estación elevadora del Tunjuelo, fue definir las características de los elementos estructurales principales, de manera que se tenga seguridad sobre su viabilidad técnica y constructiva y poder determinar con confiabilidad un presupuesto de obra.

Como base para el análisis y diseño estructural se acogió el Código ACI 350R-01. “Environmental Concrete Structures”. Se adoptó resistencia mínima a la compresión del concreto de $f'_c = 28$ Mpa. Las cargas debidas al empuje del suelo, así como los valores del módulo de reacción o de balasto fueron tomados del Informe Geotécnico de la estación de bombeo, donde se analizó de manera detallada el proceso constructivo de la excavación mediante el programa Plaxis. Posteriormente se realizó una reunión metodológica con el área de geotecnia y se estableció la manera de aplicar los resultados del modelo geotécnico (Plaxis) al modelo estructural (SAP) en las diferentes etapas constructivas. Con los dos primeros y teniendo en cuenta las cargas impuestas se realizaron comparaciones entre los resultados del SAP y los esfuerzos de referencia obtenidos del Plaxis encontrando que la magnitud de esfuerzos y el comportamiento es compatible y aceptable.

Se consideró la carga muerta debida al peso propio de la estructura, la que es calculada automáticamente por el programa SAP

Se consideró también la reacción del tornillo sobre la estructura y las cargas de las casetas sobre la estructura.

En la figura 8 se muestra esquemáticamente la ubicación de estas cargas definidas de acuerdo con la información enviada por el fabricante.

De acuerdo con los resultados del estudio geotécnico se definieron los empujes considerados para el análisis estructural. Estos empujes consideran los empujes horizontales efectivos por el suelo y por la acción del nivel freático

En las Figuras 9 y 10 se presenta de forma gráfica los empujes considerados en el modelo tridimensional general de la estructura.

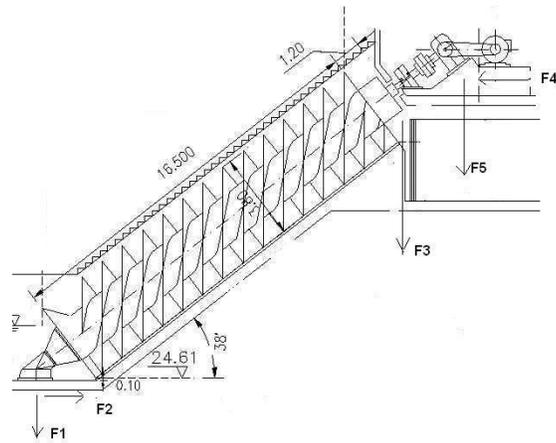


Figura 8 - Reacciones del tornillo sobre la fundación

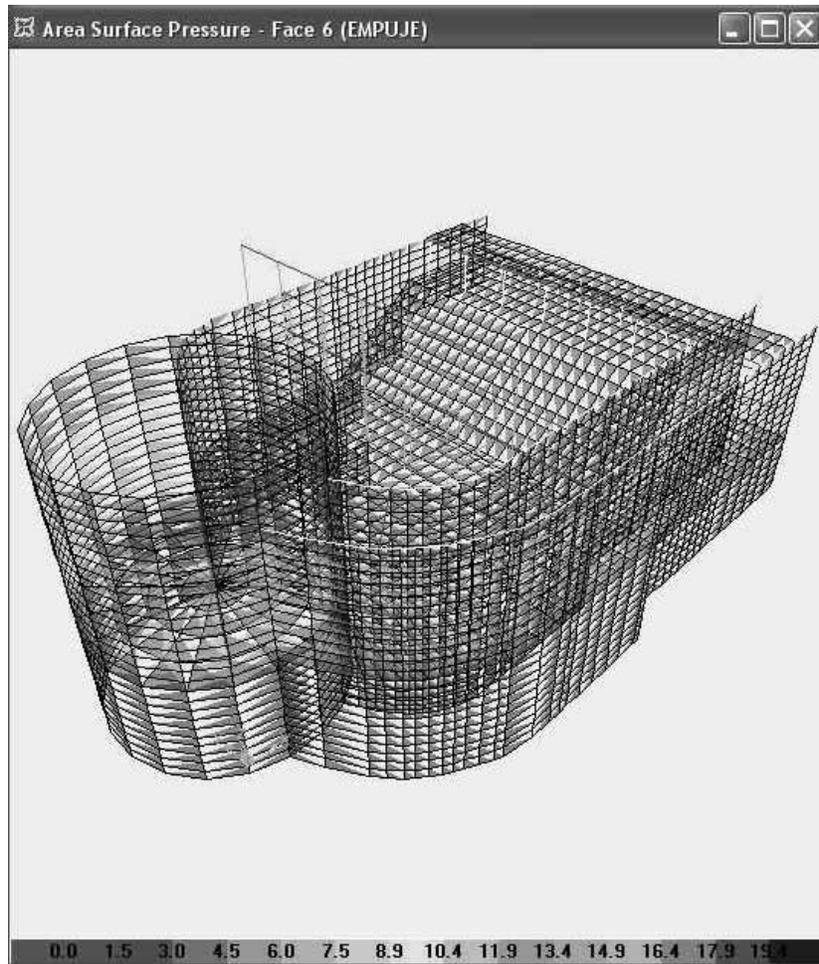


Figura 9 - Empujes en ton/m^2 aplicados a las pantallas

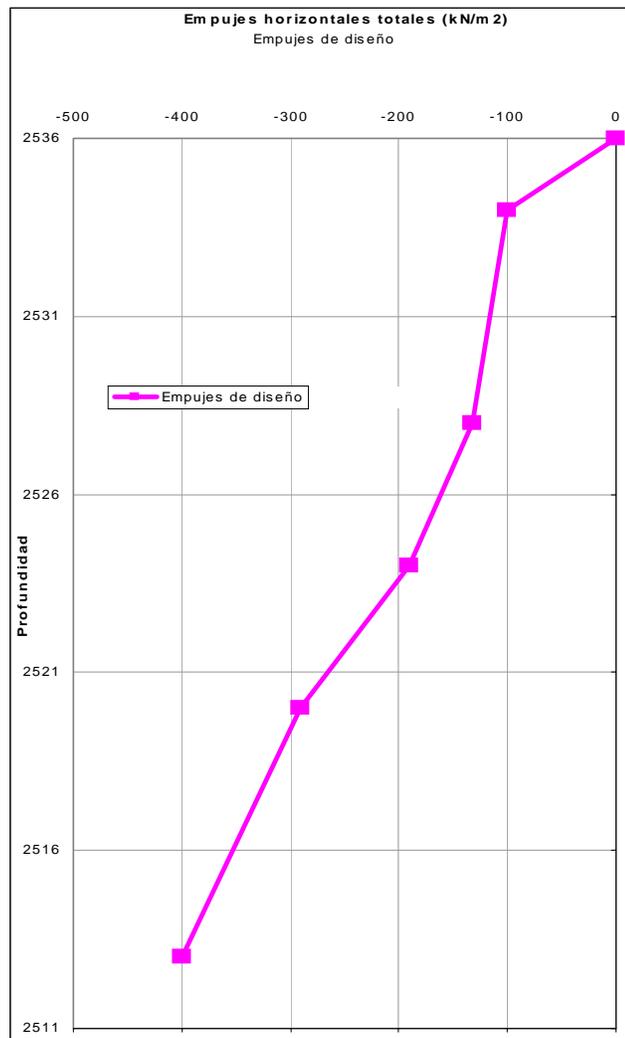


Figura 10 - Distribución de empujes en las pantallas

Se consideró además una sobrecarga máxima de 15 ton en un área de 1,0 m² actuando a un metro de distancia de las pantallas por el lado exterior en el nivel 2.536 m debida a las cargas de las grúas utilizadas para el montaje de los tornillos y demás equipos. En la figura 10 se presenta gráficamente la variación de esta sobrecarga con la profundidad.

Las cargas de subpresión en las losas de fondo se consideran actuando perpendicular a la superficie, tratando de levantar la losa de fondo y se estimó como la columna de agua hasta el nivel de la losa y considerando que, según el estudio geotécnico, el nivel freático se encuentra en la cota 2.534 m.

Para la definición del modelo estructural se tomaron en cuenta las dimensiones y propiedades geométricas estimadas para el proyecto de acuerdo con los resultados del diseño hidráulico y el diseño geotécnico.

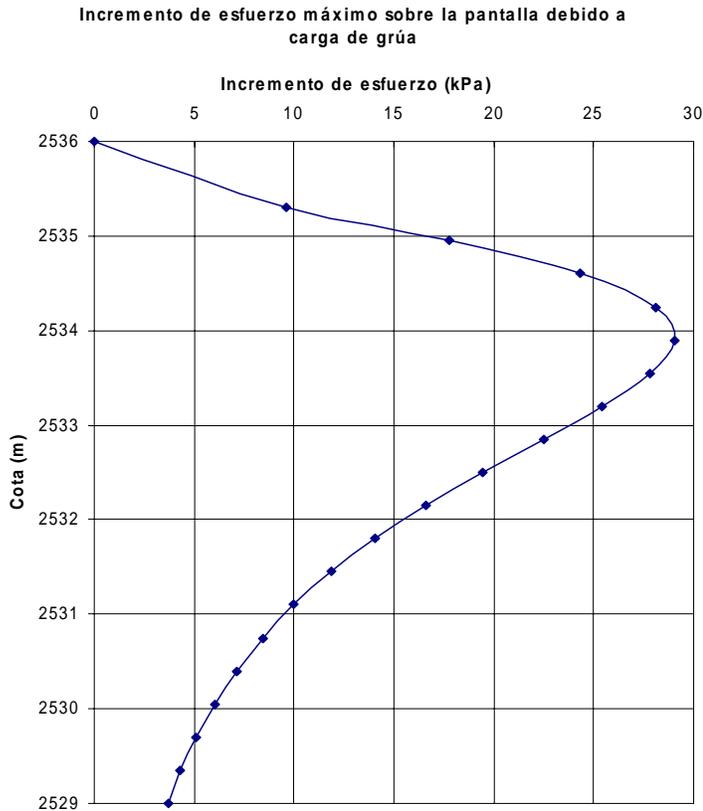


Figura 11 - Sobrecarga por carga de grúa

El modelo se realizó mediante la utilización del programa SAP 2000, el cual es un programa de análisis estático y dinámico bi y tridimensional, basado en la teoría de los elementos finitos. Permite modelar elementos tipo viga y columna (prismáticos y no prismáticos), cáscaras, membranas y elementos sólidos tridimensionales.

Las estructuras lineales convencionales se modelaron en dos dimensiones con elementos tipo viga ó FRAME formando un marco con apoyos simples. Los muros pantalla que tienen orificios de gran tamaño, curvaturas pronunciada y bifurcaciones se modelaron mediante elementos tipo membrana o SHELL.

De acuerdo con los resultados de los diseños hidráulico y geotécnico se predimensionaron los elementos y luego a través de un proceso iterativo con los análisis efectuados de los resultados del programa se definieron las dimensiones básicas de los mismos. Con el objetivo de simular el comportamiento real de la estructura se aplicaron los empujes a todo lo largo de la pantalla por la parte exterior, colocando apoyos elásticos a partir del fondo de la excavación para representar el efecto del suelo. La rigidez del suelo se definió con base en los análisis geotécnicos. Para considerar la rigidez de los apoyos de los pilotes y pantallas se tomó la rigidez de acuerdo con la elasticidad de las mismas y los posibles asentamientos de servicio a corto y largo plazo.

Se realizaron tres modelos estructurales, así:

3.1 MODELO GENERAL

La estación ha sido concebida como una estación de bombas tornillo, a doble nivel, con 12 bombas por nivel, además, esta organizada como una estación simétrica, con dos pozos de llegada, correspondientes a cada uno de los afluentes. Los pozos de llegada, están conectados para poder bombear el total del caudal afluente a la estación desde cualquiera de los lados de la misma. Por lo anterior se realizó un modelo parcial que incluyó el pozo de llegada, el primer nivel de tornillos y la caseta del primer nivel, en este punto se realizará una junta de dilatación. En este modelo se considera que se han realizado todas las etapas de excavación del proceso constructivo, es decir la estación se encuentra lista para entrar en funcionamiento y los elementos estructurales son definitivos. Se consideran todas las cargas incluyendo la subpresión, las cargas de apoyos de tornillos y la sobrecarga por montaje.

En la figura 12 se ilustra el modelo tridimensional realizado. Nótese las vigas de apuntalamiento y los contrafuertes exteriores, colocados en las partes rectas y altas de las pantallas para controlar las deformaciones de las mismas.

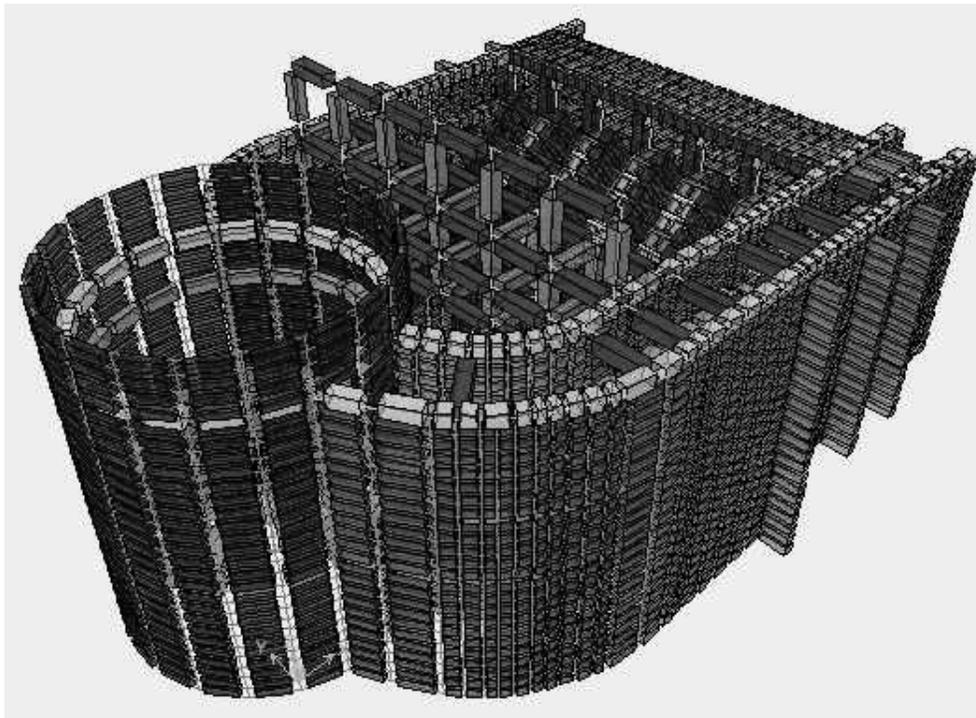


Figura 12 - Vista general del modelo en SAP

3.2 MODELO CON EXCAVACIÓN HASTA LA COTA 2.529 m

Se considera que sólo se han realizado las vigas cabezales, vigas cinturones, columnas y vigas puntales en las cotas 2.536 m y 2.532 m. En este modelo aun no se han fundido la losa inclinada, las vigas cajón que separan los tornillos, ni las losas de fondo en las cotas 2.524 m y la losa del pozo. Es decir, la excavación apenas esta llegando a la cota 2.529 m.

3.3 MODELO CON EXCAVACIÓN HASTA LA COTA 2.524 m

Se considera que sólo se han realizado las vigas cabezales, vigas cinturones, columnas y vigas puntales en las cotas 2.536 m, 2.532 m y 2.529 m. En este modelo aún no se han fundido la losa inclinada, las vigas cajón que separan los tornillos, ni las losas de fondo en las cotas 2.524 m y la losa del pozo. Es decir la excavación apenas esta llegando a la cota 2.524 m.

Con el objetivo de analizar los resultados de deformaciones y reacciones en el suelo se consideraron las combinaciones de carga en servicio. Con el objetivo de realizar la disposición del refuerzo en los elementos se realizaron combinaciones últimas, en donde se tiene en cuenta el factor de mayoración de 1,3 para flexión y cortante en estructuras sanitarias. Adicionalmente en el diseño se tienen en cuenta los Coeficientes de Durabilidad Sanitarios para tensión directa de 1,65 y compresión de 1,0.

Además, para los elementos estructurales directamente en contacto con líquidos se controló la fisuración de acuerdo con el Código ACI 350R-01.

4. PROCESO CONSTRUCTIVO GENERAL

Un aspecto fundamental para la factibilidad del proyecto y que determina el comportamiento de esfuerzos y deformaciones de la estructura y el suelo es el proceso constructivo. Para el caso de los estudios básicos de la estación se consideró con detalle el proceso constructivo que se indica a continuación.

- Excavación general en el área de la estación de bombeo entre las cotas 2.540 msnm y 2.536 msnm, así como de las vías de acceso. Es recomendable que antes de seguir con otras etapas se culmine ésta, con el fin de permitir el rebote del terreno por alivio de esfuerzos, minimizando deformaciones posteriores en el terreno y adicionalmente, se instalen mojones en el terreno para el control superficial de deformaciones.
- Excavación y fundida de muros pantalla y pilotes. Es conveniente que la construcción de los muros pantalla sea posterior a la de los pilotes, con el fin minimizar cambios de alineamiento o desplazamientos de los muros. En cuanto al canal comunicante entre las cámaras de recepción, se debe proceder en primer lugar con el muro pantalla interno a la estación, y posteriormente con el otro muro pantalla.

- Luego de vaciadas las pantallas y los pilotes debe realizarse la viga cabezal por la cota 2.536 m, demoliendo la parte superior de la pantalla y fundir la viga para que quede conjunta con las pantallas. Se funden igualmente las vigas puntales que van a este nivel.
- Cada etapa de excavación debe continuar sólo cuando los elementos definitivos o temporales de contención estén debidamente instalados y en capacidad de resistir sus cargas de diseño
- Realizar la excavación por etapas, inicialmente hasta la cota 2.532 m para proceder a realizar las vigas cinturones y puntales de este nivel y la losa correspondiente y así sucesivamente hasta llegar a la cota 2.524 m.
- Las losas se realizarán apoyadas en las vigas cinturones en los niveles respectivos.
- Durante las etapas de excavación se presentarán levantamientos del fondo debido al alivio de esfuerzos, por lo que es conveniente controlar las tasas de avance de las deformaciones en el terreno mediante instalación de testigos empotrados en el terreno por debajo del nivel final de excavación.
- Luego de tener la excavación completa y conformadas las vigas, puntales y losas se procederá a realizar las obras faltantes como los muros separadores del pozo de llegada, los huecos para el canal y descarga a tornillos. Así mismo se realizaran las vigas separadoras de tornillos, etc.
- Construcción de las casetas del primer y segundo nivel de tornillos.
- Se recomendó instrumentar las pantallas de las cámaras de recepción y los fosos de salida de éstas hacia el comienzo de las bombas, mediante la instalación de inclinómetros a todo lo largo de la pantallas localizados en la parte media de las luces mas amplias entre apuntalamientos. También se recomendó que se haga un monitoreo de deformaciones del terreno en puntos del perímetro de las pantallas, al nivel 2.536, al nivel del terreno natural y en varios puntos de las estructuras de las casetas de bombas. Este control de deformaciones se debe hacer durante la construcción y por lo menos durante dos años luego de la construcción.

5. CONCLUSIONES

La estación de Bombeo del Tunjuelo es una estructura compleja de gran magnitud, con excavaciones muy profundas en suelos arcillosos blandos. Para su funcionamiento la estructura tiene limitaciones de asentamientos diferenciales en los tornillos, para lo cual se debe analizar en detalle tanto el comportamiento del suelo como de la estructura y la interacción de estos en el marco del proceso constructivo.

El problema es tridimensional, pero las herramientas para el análisis de los modelos de interacción suelo estructura (Plaxis) son bidimensionales y no permiten modelar tridimensionalmente el problema excepto para una condición axisimétrica. Por otra parte los modelos estructurales tridimensionales (SAP2000), no permiten modelar la interacción suelo estructura, excepto por medio de apoyos elásticos y cargas equivalentes, y tienen limitaciones para modelar las secuencias de construcción, que son muy importantes para definir la respuesta real de la estructura. Por lo tanto se hace necesario interpretar los resultados claves del análisis de interacción suelo estructura para definir los parámetros representativos del análisis estructural.

Estos incluyen, en primera instancia la definición de los pilotes de refuerzo del suelo para poder controlar las deformaciones de los suelos por expansión a corto y largo plazo. Por otra parte, se deben definir los empujes equivalentes de suelos que sean aplicables al modelo estructural, y los módulos de reacción del suelo correspondientes.

Se debe tener en cuenta que las cargas que se aplican en el análisis estructural tienen que ser cargas que el terreno aplique a la estructura antes de que ésta se deforme. Por lo tanto los análisis de interacción suelo-estructura tienen dos componentes. Uno para determinar las cargas compatibles que se deben aplicar a los modelos estructurales, en los que se restringe la deformación de los elementos estructurales mediante apoyos adicionales y otra en la que se consideran las condiciones reales de apoyo y que permite obtener las deformaciones y esfuerzos de los elementos estructurales.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta en los análisis de interacción suelo estructura es el de la selección de los coeficientes de reacción de la subrasante. Estos por definición corresponden a la deformación por unidad de carga en una apoyo tipo resorte. Los análisis de interacción suelo – estructura permiten calcular el valor de estos coeficientes. Sin embargo estos valores se deben definir con cuidado pues dependen de la magnitud de las cargas y deformaciones del suelo, los cuales a su vez varían con el proceso de construcción, y localmente en diferentes partes del modelo.

6. REFERENCIAS

1. Diseño de obras de expansión. Diseños básicos del interceptor río Bogotá-Fucha-Tunjuelo y de la estación de bombeo. Investigación geotécnica. Producto 2- Volumen 2 de 3. TECN-968-001-IF-GE. Versión 01. Estudio de actualización del plan maestro de alcantarillado de la cuenca del Fucha. HMV Ingenieros 2003
2. Decreto 074 de enero 30 de 2001, por medio del cual se complementa el Código de construcciones de Bogotá, Distrito capital y se identifican los límites de la microzonificación sísmica y se adoptan los espectros de diseño.
3. TOMO II- informe geotécnico de los diseños básicos para la estación de bombeo INDS-968-001-EB-GE. HMV Ingenieros. 2003
4. ANEXO 2 Informe geotécnico de los diseños básicos para la estación de bombeo de este informe general, INDS-968-001-EB-GN-ES. HMV Ingenieros. 2003
5. Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., (1999) Formulation and verification of the Hardening Soil Model. Intl. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics