EXCAVACION CAJON COMO ESTRUCTURA PARA MANEJO DE CARBON DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y COMPORTAMIENTO

VAULT EXCAVATION AS A STRUCTURE FOR COAL HANDLING DESIGN, CONSTRUCTION AND BEHAVIOR

Ing. José N. Gómez S., M.Sc.(1)
Ing. Luis Eduardo Escobar B., M.Sc.(2)
Ing. Gilberto Rodríguez Ch., M.Sc.(1)
Ing. Hector Ivan Díaz G.(3)
C.I.C. Consultores de Ingeniería y Cimentaciones Ltda.

Ing. Eugene J. Honeycutt, Jr.
Drummond Limited
Manager Preparation and Facility Engineering

RESUMEN

Con el propósito de poder manejar el carbón proveniente en vagones férreos de la mina La Loma en Cesar, la Drummond Ltd (DLTD) Colombia, en el puerto localizado a 6km al noroeste de Ciénaga, Magdalena, construyó una estructura subterránea de casi 15m de profundidad, en forma de cajón, en donde los vagones que transportan el carbón lo depositan, el cual luego es llevado por una banda transportadora a lo largo de un túnel hasta una torre de distribución radial ("radial stacker"), que almacena el carbón en un patio para su destino final.

El cajón con sección 31.07 x 12.38m y 14.17m de profundidad, se conectó en el fondo con un túnel de inclinación de 9º, con sección 4.6 x 2.33m y 32.5m de longitud, que sale a la superficie; la bóveda fue excavada en un depósito de arenas de grano medio con intercalaciones de capas delgadas de limo y con un nivel freático localizado a 2.5m (cota+7.5m.s.n.m) de la superficie natural del terreno. Para la ejecución de la excavación fue necesario construir una pantalla perimetral preexcavada en concreto, de 18m de profundidad y 0.60m de espesor; adicionalmente, se requirió de la instalación y operación continua de un sistema de bombeo de pozos profundos, consistente en 16 unidades, instaladas a 18m de profundidad, para abatir el nivel freático y reducir las presiones laterales de la tierra y la subpresión durante la construcción. En este artículo se presentan las consideraciones de diseño de las presiones laterales de tierra, sistemas de soporte y desecación, consideraciones de construcción y comportamiento (instrumentación).

PALABRAS CLAVES: Excavación, Arenas, Abatimiento N.F., Soportes.

SUMMARY

In order to handle coal coming by train from La Loma Coal Mine, Department of Cesar, Colombia S.A., Drummond Ltd. (DLTD) Colombia built a vault 15m deep where the coal is dumped from train wagons, then it is transported by belts conveyors through a tunnel to a radial stacker, which finally stockpiled it over the surface for its final destination.

The vault has a section of 31.07 x 12.38 m and 14.17m deep; it was connected at its bottom with a tunnel with an inclination of 9º, whose rectangular section is of 4.6 x 2.33m and its length is of 32.5m, the tunnel ends at the surface. The vault was excavated through a saturated medium to dense sand deposit with thin lenses of silt and sandy silt; water table was found at 2.5m bellow surface. For carrying out vault excavation, a perimetral 0.60m thick concrete wall 18m deep was built first; additionally, the installation and continuing operation of a pump system of 16 deep wells 18m deep, was required to drawdown the water table and to reduce (1) lateral earth pressure on the wall and (2) uplift pressure at the bottom slab during construction. In this article the design considerations for lateral earth pressure, temporally and permanent support system and drawdown; construction experiences and behavior (instrumentation) are presented.

(1) Subgerente Técnico (2) Gerente (3) Ingeniero Diseños

INTRODUCCION

La DLTD durante el primer semestre de 2001, construyó la estructura – cajón (“car dumper”) requerida para el manejo de carbón antes de ser llevado a los buques de carga por bandas transportadoras. Esta estructura tiene características especiales, debido a su tamaño, profundidad y requerimientos para la instalación de equipos electromecánicos para el manejo y cargue del carbón. El cajón se construyó en dos etapas, en la primera, se excavó y construyó una pantalla preexcavada en concreto, de 0.60m de espesor y 18m de profundidad y una profundidad variable entre 18 y 9.58m para el túnel, mediante el método tradicional de secuencia de excavación panel primario – panel secundario con contrafuertes; en algunos paneles se instalaron inclinómetros para conocer las deformaciones durante la excavación; paralelamente, se instaló un sistema perimetral

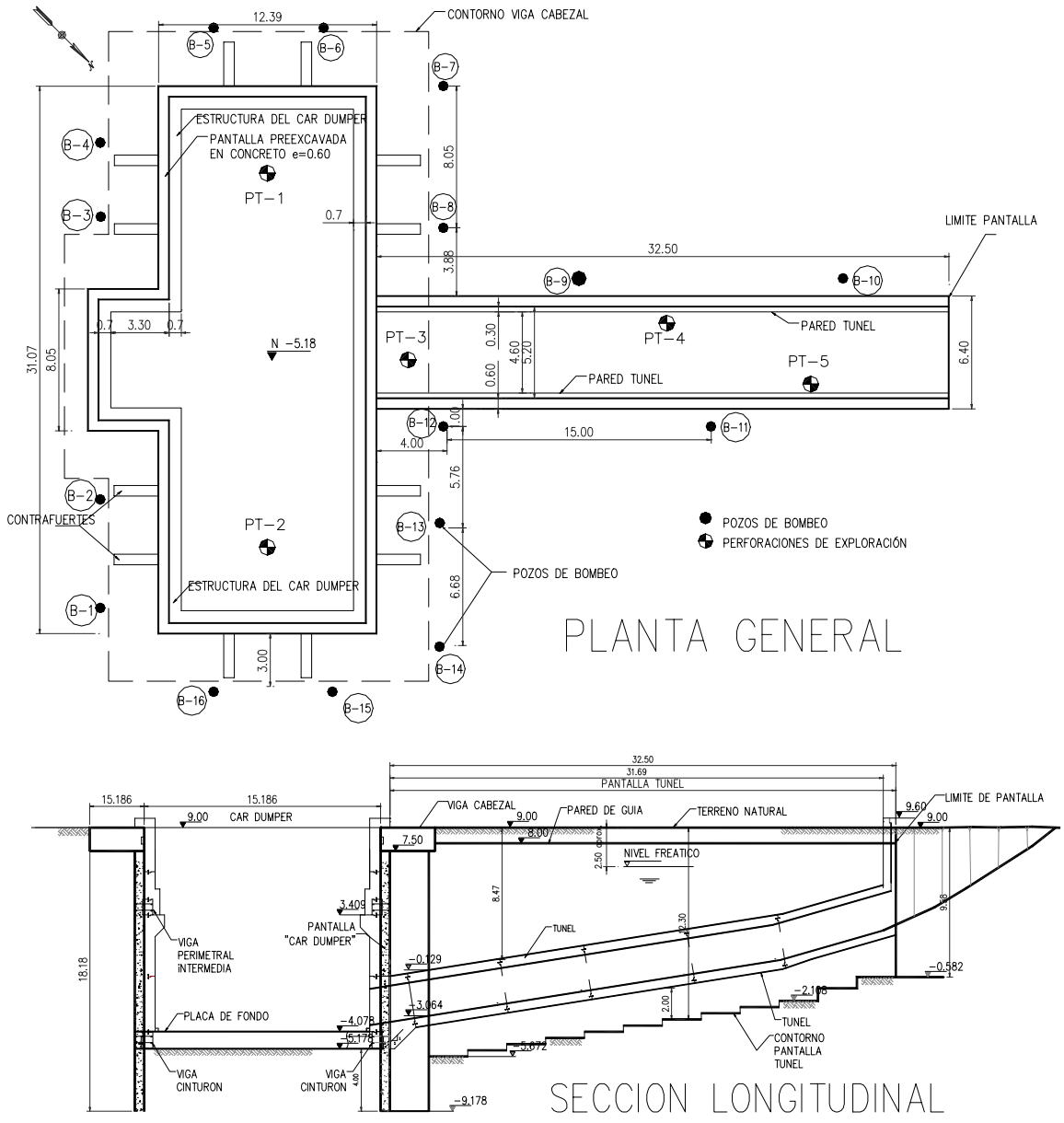

Figura 1. Pantalla preexcavada; planta general y sección

de bombeo con pozos profundos, consistente en 16 bombas de 10-12lt/seg de capacidad y localizadas a 18m de profundidad en cada uno de los pozos; este sistema se complementó con la construcción de 8 piezómetros de tubo abierto tipo Casagrande para verificar durante construcción el abatimiento del nivel freático. Antes de iniciar la excavación del cajón, se realizó una prueba de bombeo con el propósito de afinar el diseño del sistema de bombeo. Durante la excavación, a través de arenas medias saturadas con intercalaciones de capas de limo, secuencialmente se construyó el sistema de soporte de la pantalla, consistente de una viga cabezal en concreto en la superficie (cota+9.0m.s.n.m.) de 3.5 x 1.5m, una viga perimetral intermedia en la cota+3.409m.s.n.m. (a 5.591m de profundidad) de sección 1.0 x 0.7m y finalmente, una viga cinturón en el nivel –2.928m (a 11.928m de profundidad) de sección 1.3 x 1.0m con cuatro (4) codales transversales de concreto con sección de 1.3 x 0.6m. En la Figura 1 se presenta una planta y sección del proyecto.

Básicamente, la segunda etapa de construcción consistió en los concretos definitivos de la placa de fondo y los concretos para conformar una pared estructural reforzada de 0.70m de espesor con algunas ménsulas de apoyo para los equipos mecánicos, tolvas y tamices de acero; finalmente, al unir la pantalla preexcavada con la pared estructural, se obtuvo un muro con un espesor total de 1.3m.

Para la construcción de la obra relacionada con el “car-dumper” y el túnel, fue necesario excavar del orden de 5.900m^3 de arenas y limos, colocar un volumen de 3.800 m^3 de concreto y 600tn de acero de refuerzo; la longitud total de pantalla construida fue de 180m incluyendo los contrafuertes. El sistema de bombeo tuvo una capacidad promedio de 125 lt/seg, operando durante 3.5 meses, evacuó del orden de 1.134.000m^3 de agua (el promedio diario fue de 10.800m^3, equivalente al agua requerida para una población de unas 30.500 personas). La obra fue construida entre el 15 de febrero y el 15 de agosto de 2001 por el Consorcio H.L. Ingenieros S.A. – Equipos, Andamios y Encofrados S.A. (Col.), los diseños de la pantalla preexcavada, sistema de soporte, instrumentación, sistema de bombeo fueron realizados por C.I.C. Consultores de Ingeniería y Cimentaciones Ltda (Col.), y los diseños estructurales por Industrial Resources Inc. (U.S.A.). En este artículo se presentan las consideraciones de diseño, construcción y comportamiento del “car-dumper” y el túnel.

CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO

El proyecto se localiza en una llanura costera subyacida por detritos de montaña, comprendida entre el piedemonte del batolito de la Sierra Nevada de Santa Marta y el mar Caribe. La topografía es de pendiente suave, con una elevación promedio de 9.6m.s.n.m. El subsuelo, como se describe más adelante, está constituido por depósitos sedimentarios conformados por arenas de grano fino a grueso, medianamente densos y limos de consistencia media. Estos depósitos de edad Cuaternaria son subyacidos por suelos residuales firmes a duros, formados a partir de rocas ígneas tipo granodioritas de edad Terciaria.

Con el propósito de conocer las propiedades físico-mecánicas del subsuelo y su distribución estratigráfica, se realizaron en total cinco (5) perforaciones de 35m de profundidad, distribuidas como se muestra en la Figura 1 (tres perforaciones en el área del “car-dumper” y dos en el área del túnel). A partir de las perforaciones fueron extraídas muestras para determinar humedades, distribuciones granulométricas, porcentajes de pasa tamiz No. 200, límites de consistencia y cortes directos; adicionalmente, durante la ejecución de las perforaciones, se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT), permeabilidad de campo y se midió el nivel freático. Por medio de los ensayos de laboratorio y de campo, se establecieron los parámetros para los diseños, como son

los pesos unitarios (γ), ángulo de fricción interna (ϕ), cohesión (c) y coeficiente de permeabilidad (k).

En la Figura 2 se presenta el perfil estratigráfico representativo en el área del “car-dumper” y el túnel. En la misma figura se muestran los valores de porcentaje de finos y los resultados del ensayo SPT en términos del número de golpes por pie (N). Desde la superficie hasta una profundidad de 15m, la estratigrafía está caracterizada por la presencia de arenas de grano fino a grueso limosas con presencia de algunas gravas finas (Estratos 1A y 1B), medianamente compactadas (N = 10-20 golpes/pie), con intercalaciones de limos arenosos con espesores que varían entre 2 y 5m. Por el predominio de los limos en estos estratos, su permeabilidad es más baja que la de los estratos con predominio de arenas.

A partir de los 15m de profundidad y hasta la profundidad explorada de 35m, se evidenció un drástico incremento de la resistencia a la penetración estándar (N>50 golpes/pie). Este incremento marca el inicio del depósito de montaña conformado por gravas de grano fino a grueso (Estrato 3) y el horizonte de suelos residuales (Estrato 4).

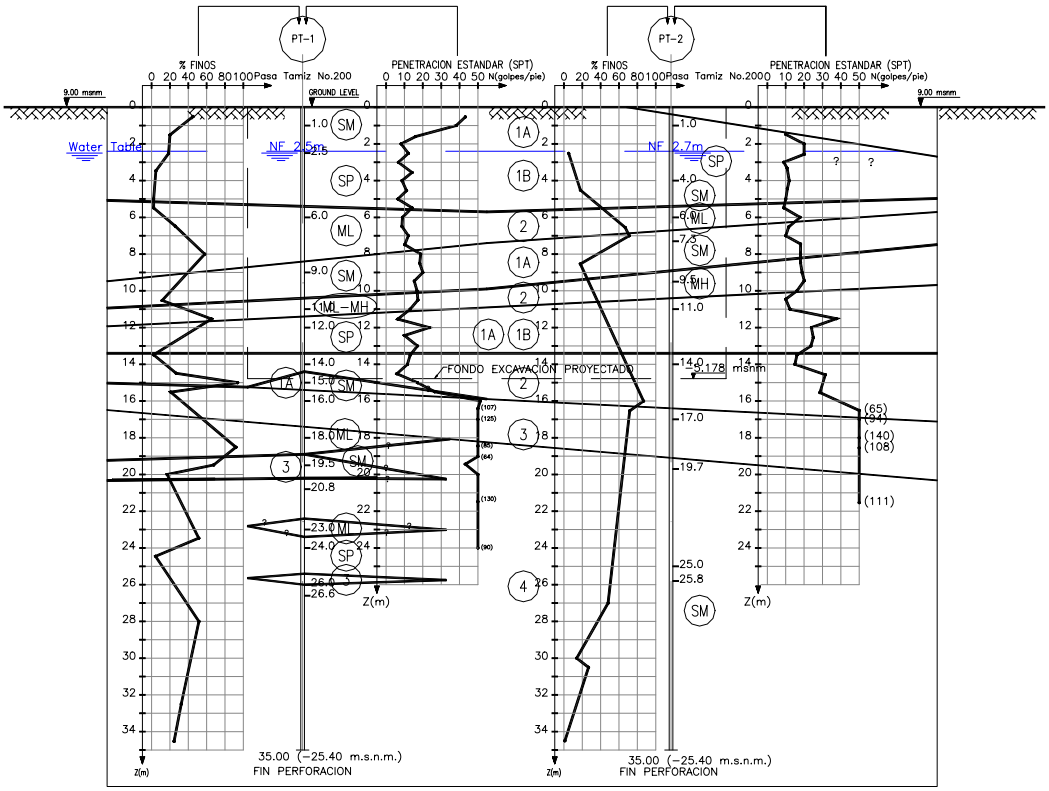

Figura 2. Perfil estratigráfico típico (ver Cuadro 1 para propiedades)

Para la evaluación inicial del coeficiente de permeabilidad (k) representativo del depósito granular. Con el propósito de diseñar el sistema de bombeo, el cual se describe con detalle más adelante, se realizaron ensayos de permeabilidad en las perforaciones exploratorias, obteniéndose un valor promedio de $k=7.83 \times 10^{-5}$m/seg. Como referencia fueron empleados también los valores obtenidos a través de correlaciones con la granulometría y clasificación de los materiales disponibles en la literatura geotécnica, obteniéndose un valor promedio de $k=2.72 \times 10^{-4}$-3.54×10^{-5}m/s. Los valores obtenidos a partir de las correlaciones granulométricas son probablemente más altos ya que el porcentaje de finos considerado es del 5% y el depósito granular presentó un porcentaje del orden

del 12%. Finalmente se adoptó el valor de la permeabilidad obtenida directamente en el campo ($k=7.83x10^{-5}$m/seg). En el Cuadro 1 se presenta un resumen de los parámetros fisicomecánicos empleados para la realización de los cálculos y diseños, advirtiendo que ningún material presentó cohesión (c).

CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Presiones Laterales de Tierra. Para el cálculo de las presiones laterales de tierra se consideraron dos etapas: (1) excavación y (2) operación del "car dumper". En la primera etapa el coeficiente de empuje del suelo se adoptó como un promedio de la condición activa y reposo (Ko + Ka) /2, teniendo en cuenta que la pantalla podía experimentar algunos desplazamientos menores. En la etapa de operación, una vez terminados los concretos de segunda etapa, estructuras internas y

Estrato	Descripción de los Suelos	γ (tn/m^3)	ϕ (^{o})	Es (tn/m^2)
1A	Arenas de grano fino limosas color habano claro	1.8	35	4060
1B	Arenas de grano medio a grueso color habano claro	1.8	40	4300
2	Limos arenosos color gris oscuro verdoso	1.7	25	1032
3	Gravas de granito blanco a gris claro de grano fino a medio	2.0	40	-
4	Arenas finas limosas color gris claro verdoso (probable suelo residual)	2.0	40	9340

γ= Peso unitario
ϕ= Angulo de Fricción interna
Es= Módulo de deformación secante

Cuadro 1. Parámetros fisicomecánicos y características de los materiales

cuando el espesor total de las paredes fuera de 1.3m, se consideró la condición de empuje de tierras debido a la restricción del desplazamiento de la pantalla en reposo (Ko). Para la etapa de excavación era imperante abatir el nivel freático hasta una profundidad de 17m; para la operación del proyecto, se consideró el caso más desfavorable con el nivel freático en la superficie del terreno (el NF usualmente se encontró a 2.5 – 2.7m por debajo de la superficie). Finalmente, la pantalla se diseñó con un empotramiento de 4m, con el fin de controlar el gradiente hidráulico que pudiera ocasionar tubificación o ebullición. Las hipótesis que se plantearon para el diseño de las presiones laterales de tierra fueron las siguientes:

- Hipótesis 1: Durante operación del "car dumper", condición estática. Aplicable también para el túnel, sin considerar sobrecarga.

Condiciones de carga:
- N.F. en la superficie del terreno.
- Sobrecarga por tránsito de locomotora y vagones.
- Empuje de tierras al reposo (Ko); no hay desplazamientos de la pantalla.
- Carga sobre losa de fondo debido a estructuras y equipos.

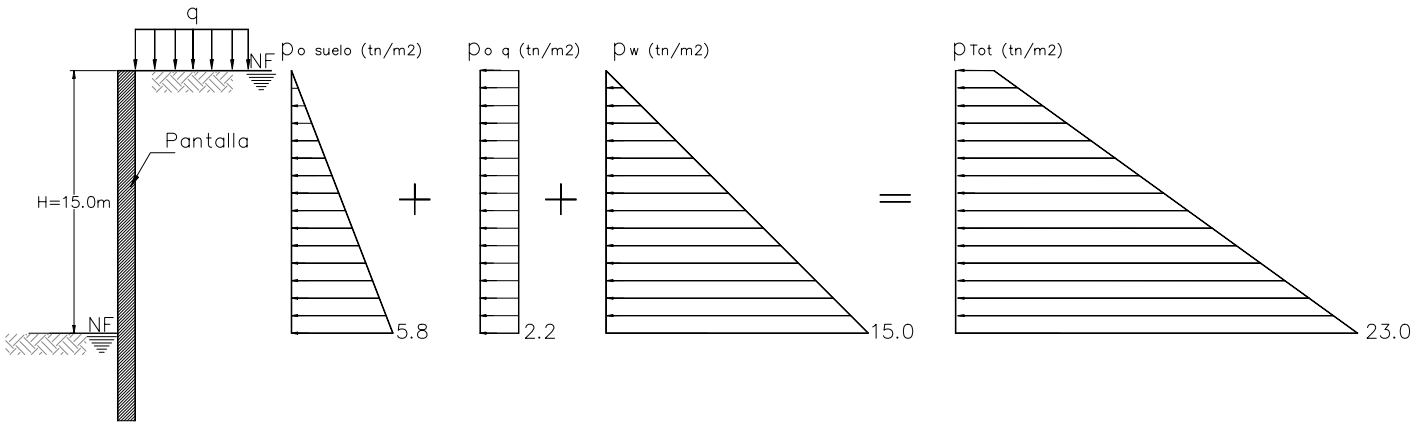

Figura 3. Presiones Laterales de tierra, Hipótesis 1 durante operación (estático).

- Hipótesis 2: Durante la operación del “car dumper”, condición sísmica.

Condiciones de carga: - N.F. en la superficie del terreno.
- Sin sobrecarga por tránsito de locomotora y vagones.
- Empuje de tierras y agua por solicitación sísmica. Aceleración pico (a=0.15g) según Norma NSR-98; empujes dinámicos calculados con metodología Mononobe Okabe.
- Carga sobre losa de fondo por estructuras y equipos.

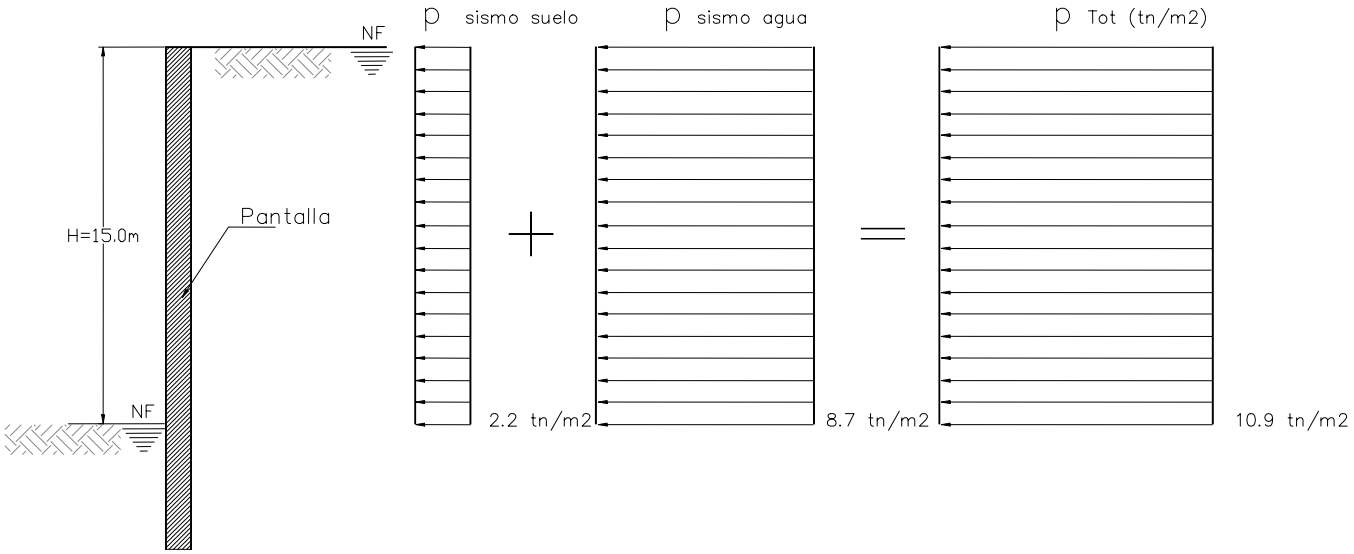

Figura 4. Presiones laterales de tierra, Hipótesis 2 durante operación (dinámico)

- Hipótesis 3: Durante excavación.

Condiciones de carga: - N.F. abatido hasta 18m.
- Sobrecarga de equipos de construcción.
- Empuje de tierras intermedio entre Ko y Ka

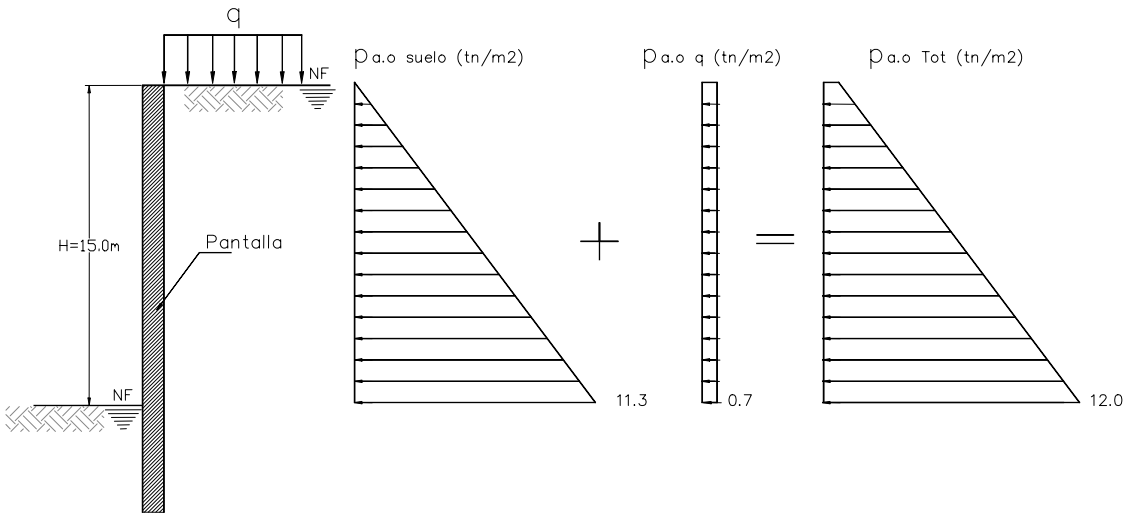

Figura 5. Presiones laterales de tierra, Hipótesis 3, durante excavación

Para disminuir las subpresiones que se generaban en la losa o placa de fondo del “car dumper” se empleó durante la etapa de excavación un sistema de bombeo permanente, descrito en la siguiente sección. Para la situación durante la operación del proyecto, la subpresión crítica en la losa es de 15tn/m^2 al igual que la máxima presión hidrostática lateral a 15m de profundidad, con el N.F. en la superficie.

Evaluación de Estabilidad y Sistema de Soporte. El enfoque que se siguió para garantizar la estabilidad del cajón de 15m de profundidad protegido con una pantalla preexcavada, desde el punto de vista filtraciones, fue el de reducir el efecto de las presiones hidrostáticas laterales sobre las paredes de la pantalla y disminuir al máximo las subpresiones en la losa de fondo (ver Figura 1), mediante el abatimiento del nivel freático con pozos de bombeo profundos; la alternativa de reducir la subpresión con una mayor longitud de empotramiento no era práctica, porque de todas maneras había que abatir el nivel freático para reducir las presiones hidrostáticas, especialmente durante la etapa de construcción.

Por otra parte, para asegurar la estabilidad de las paredes de la pantalla desde el punto de vista estructural, de tal forma que soportara las presiones laterales de tierra, se estudiaron diferentes alternativas: codales metálicos, tendones de anclajes y una serie de vigas cabezal y cinturón fuertes y perimetrales, localizadas a diferentes niveles. Los codales se descartaron ya que el gran número requerido, cada 2-3m horizontalmente y 3.0-3.5m verticalmente, impedía la excavación ágil y segura del cajón; los tendones de anclaje necesarios superaban los 11.000m, (350 unidades de 100tn) y generaban incertidumbres en su instalación debido a la presencia de agua y el tipo de material, también disminuían el rendimiento de la obra y aumentaban los costos.

Finalmente, se adoptó para el “car-dumper” (cajón) la construcción de una viga cabezal superficial con sección de 1.5 x 3.0 m; una viga perimetral intermedia de 1.0 x 0.7m en el nivel +3.40 y una viga cinturón en el nivel –2.928m a 11.928m de profundidad, de sección 1.3 x 1.0m con la incorporación estructural de cuatro (4) codales transversales de concreto con sección 1.3 x 0.6m; para el túnel, debido a que no era necesaria la construcción de concretos de segunda etapa, se adoptó la instalación de codales temporales en tubería de acero de ϕ12” y con un arreglo de 2.5m horizaontal y 3.5m vertical; en la Figura 6 se presenta una sección con la solución adoptada para garantizar la estabilidad de la excavación del cajón y el túnel.

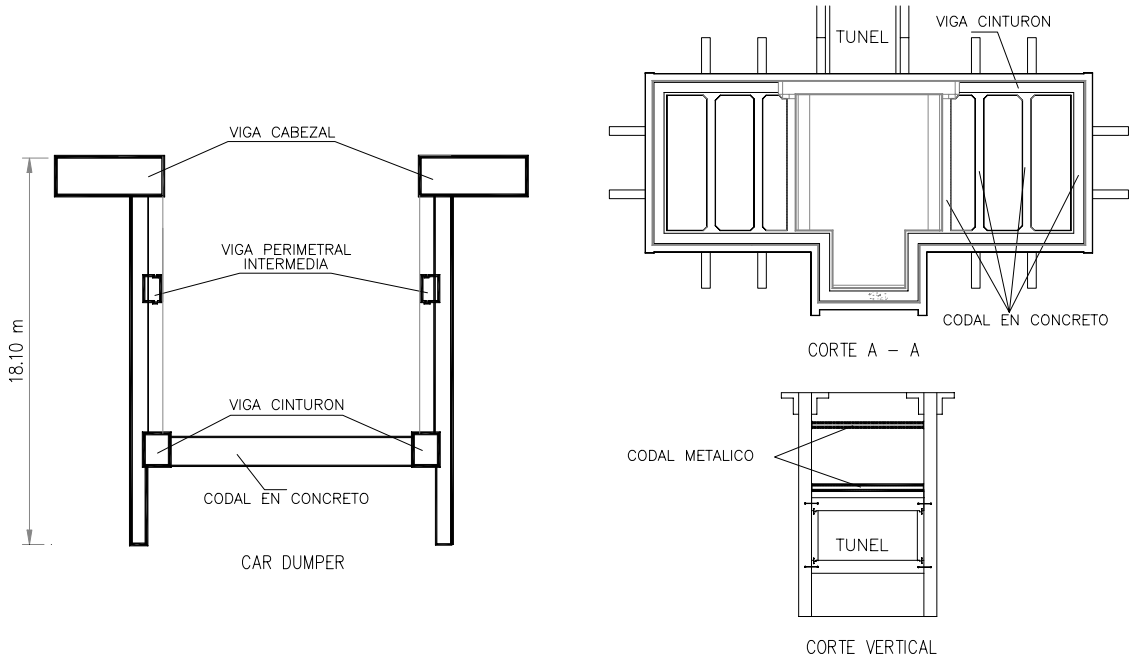

Figura 6. Solución soporte para asegurar la estabilidad del “car – dumper” y túnel

Sifonamiento y Licuación. Dentro del análisis de estabilidad de la pantalla se estudió mediante el procedimiento gráfico de redes de flujo, la pérdida de soporte lateral del empotramiento debido a la disminución de los esfuerzos efectivos a causa del flujo ascendente por la ocurrencia de un gradiente hidráulico entre el abatimiento del N.F. fuera y dentro de la pantalla. Para el potencial de ebullición o en este caso pérdida de esfuerzos efectivos en la parte interna de la pantalla se analizaron tres escenarios; manteniendo fija la posición del nivel freático (preveniendo la situación en que se colapsara el sistema de bombas cuando la excavación se encontrara en su punto más bajo) y variando el empotramiento de la pantalla, como se muestra en la Figura 7.

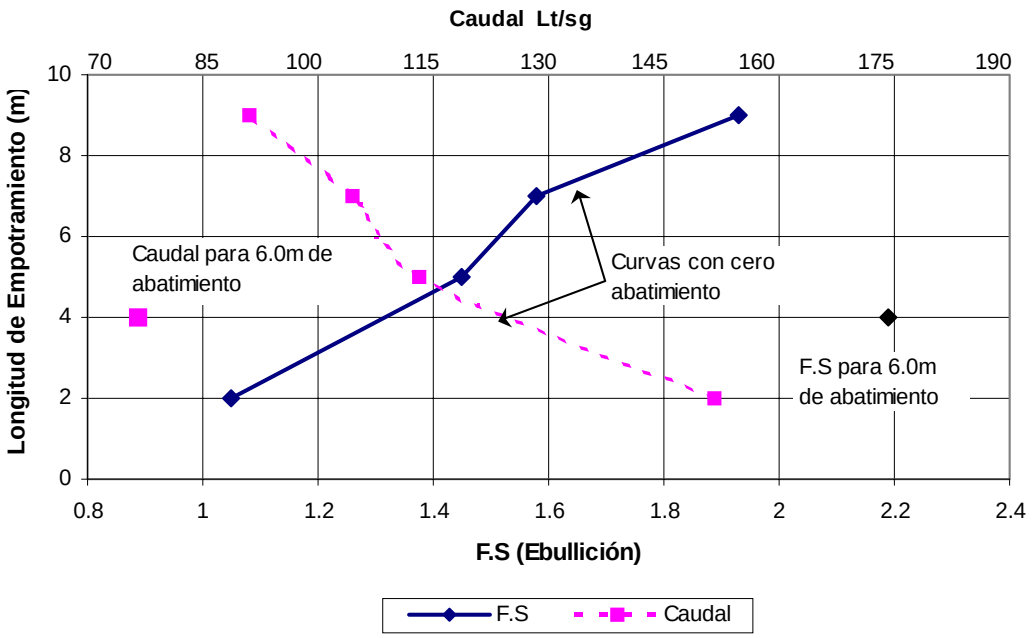

Figura 7. Longitud del empotramiento vs. F.S. y caudal

Teniendo en cuenta los casos analizados, se concluyó que en la situación más desfavorable sin abatimiento de nivel, con un empotramiento mínimo de 4.0m y la excavación en su punto mas bajo, el riesgo de sifonamiento era aceptable (F.S.=1.40), sin embargo, se requería abatir el nivel freático en cerca de 13.0m para evitar la entrada de agua al cajón y evitar las presiones de agua contra la pantalla; por lo tanto, fue el escenario empleado para los diseños. Nuevamente, es importante recalcar la importancia de abatir el N.F. en materiales granulares para disminuir las presiones laterales de tierra y la tendencia de ocurrencia de sifonamiento (pérdida de esfuerzos efectivos); además, cualquier deficiencia en la construcción de la pantalla no generaría problemas locales de ebullición.

El caso de licuación por causas dinámicas, se analizó teniendo en cuenta las propiedades granulométricas (contenido de finos) y físicomecánicas del depósito, y la actividad sísmica en la zona del proyecto, se concluyó mediante el chequeo propuesto por Seed and Idriss (1982), que el depósito con la ocurrencia del sismo probable con magnitud 5.5 (tomado del NSR98), no es licuable debido a que su grado de densificación es de mediano a alto, como se concluye de los valores de ϕ que se muestran en el Cuadro 1 (además, SPT, N 9-25 y % finos 10%, promedio estrato crítico 1B, Figura 2).

Sistema de Desecación Teniendo en cuenta que el depósito donde se excavó el cajón para la estructura del “car-dumper” es granular permeable, era muy importante garantizar en todo momento el abatimiento del N.F. durante la etapa de excavación del cajón (pantalla construida) y construcción de las obras definitivas, por varias razones: eliminar las presiones hidrostáticas sobre la pantalla, eliminar los efectos de subpresión durante las etapas de excavación, controlar cualquier deficiencia de construcción de la pantalla preexcavada (esta situación no es crítica en materiales arcillosos), en el sentido que no se generen filtraciones hacia la zona excavada, principalmente.

Con base en la anterior y a partir de la estratigrafía del depósito, el coeficiente de permeabilidad (k) adoptado y el abatimiento requerido, se procedió a determinar el sistema de desecación más apropiado, el cual consistió en pozos profundos (“deep wells”) localizados a 18m de profundidad en un total de 17. El otro sistema tradicional de puntos de bombeo o pozos de bombeo al vacío (“well points”) no resultó apropiado, especialmente por la profundidad de abatimiento necesaria.

Utilizando el procedimiento tradicional para grupo de pozos de Forchheimer (1930) basado en Dupuit (1854), se obtuvo el número de pozos citados, cada uno de los cuales con un caudal máximo de 10lt/seg, para una altura de impulsión de 18.0m; con estas características el sistema de bombeo, (Ver Figura 8) permitía un abatimiento máximo de 15.0m trabajando los pozos en grupo (170.0 lt/seg). Sin embargo, era necesario realizar una prueba de bombeo antes de comenzar con

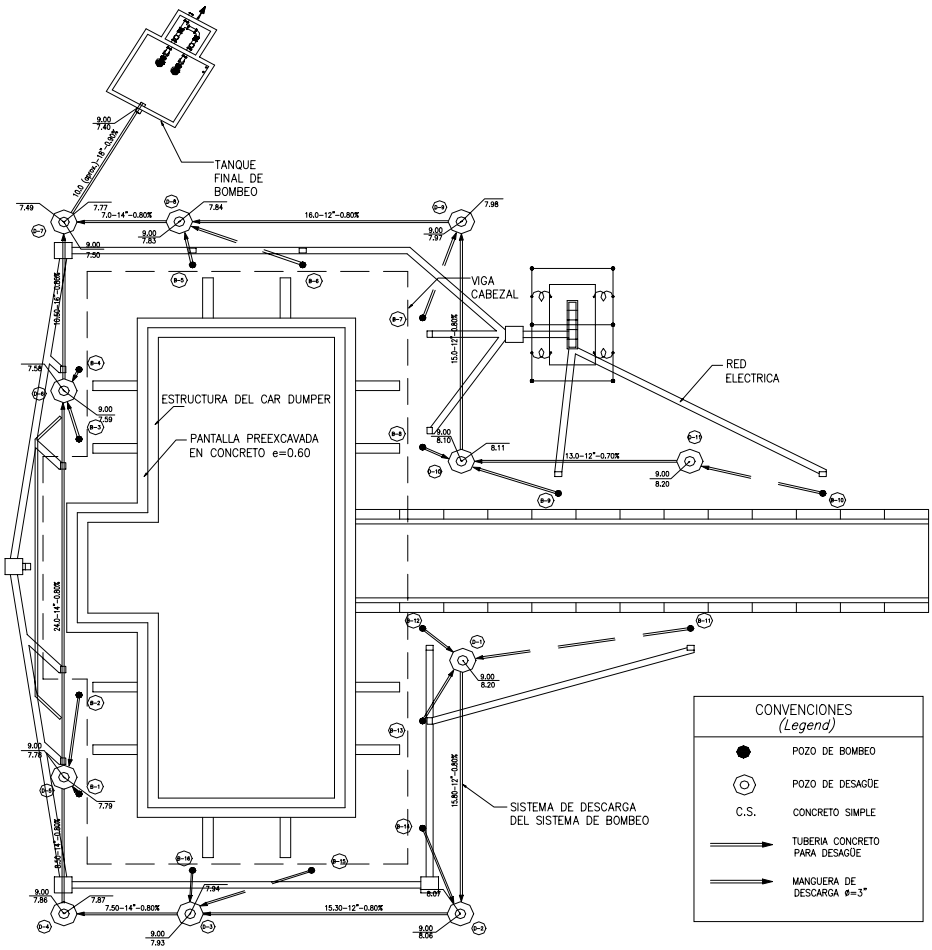

Figura 8. Sistema de bombeo y redes hidráulicas para manejo de aguas

la excavación y construcción de la pantalla preexcavada, de manera que se conformaran las características hidráulicas del acuífero y se pudieran hacer los ajustes necesarios, especialmente en lo relacionado con la permeabilidad y la modelación de la estratigrafía del depósito. El diseño inicial de los pozos se presenta en la Figura 9 y consistió en pozos de ϕ 12” (30cm) instalados en

una perforación de ϕ 17.7” (45cm), espaciados entre 6-12m alrededor de la pantalla y a 3m de ésta. Inicialmente en los primeros 3.0m, de abajo hacia arriba, del pozo se dejó la rejilla de succión en PVC RDE-21 de abertura No. 30 (0.6mm); entre la rejilla y la pared de la perforación se colocó material de filtro. La longitud y localización de la rejilla obedeció a suponer el depósito granular homogeneo desde el punto de vista permeabilidad; con base en los resultados de los ensayos de permeabilidad realizados en las perforaciones; esta hipótesis fue tal vez la más importante para ser comprobada durante la prueba de bombeo, cuyos resultados y cambios necesarios al sistema de bombeo inicialmente diseñado, se presentan más adelante en la sección de construcción.

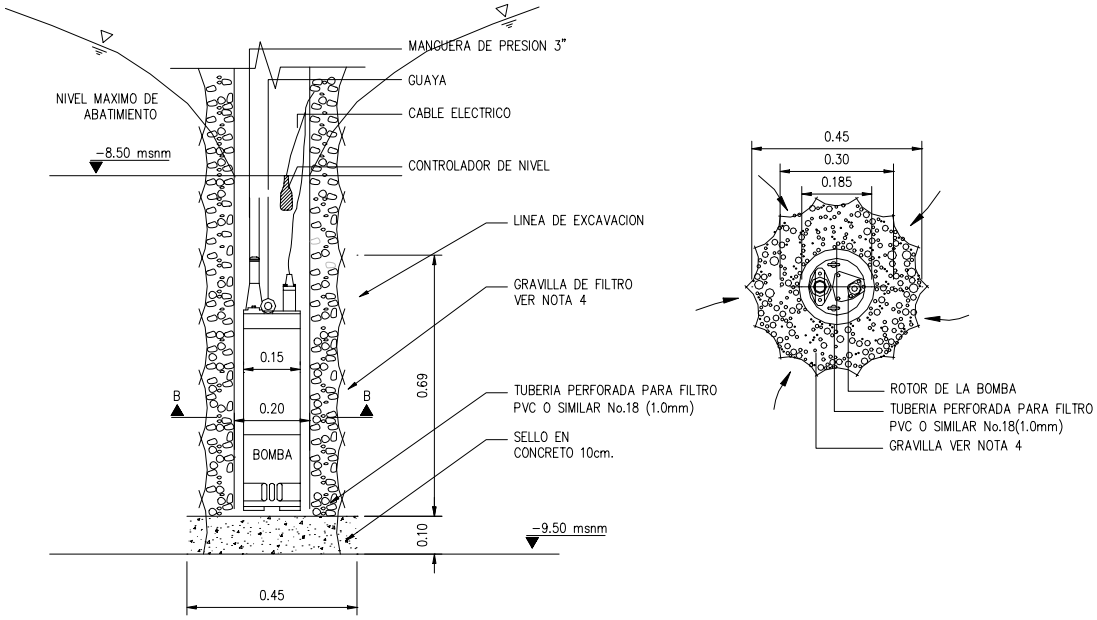

Figura 9. Detalle pozos profundos de bombeo

Finalmente, el diseño del sistema de bombeo requirió también del diseño de un sistema eléctrico para la operación segura y controlada del sistema, con el fin de proteger las bombas de secados o ahogos súbitos de los pozos; también fue necesario el diseño de una red hidráulica por gravedad para evacuar las aguas bombeados. Estos diseños no hacen parte del alcance de este artículo.

Instrumentación. El propósito de la instrumentación diseñada fue el de poder conocer el comportamiento de la estructura de la pantalla preexcavada durante la excavación del cajón resultante en su interior, teniendo en cuenta, por una parte, la magnitud de las presiones laterales de tierra y por otra parte, el abatimiento de N.F. durante todo el proceso de excavación, para asegurar la estabilidad de la obra. Para el control de los desplazamientos de la pantalla se instalaron inclinómetros en diferentes sitios como se muestra en la Figura 10, en toda la profundidad, para medir desplazamientos normales y paralelos al eje de la pantalla; como complemento de estos aparatos de colocaron taches de bronce en diferentes niveles, para medir la misma información de los inclinómetros y adicionalmente, movimientos verticales. Finalmente, se tuvieron en cuenta piezómetros de tubo abierto tipo Casagrande, para conocer los abatimientos del N.F. durante la operación del sistema de bombeo; de hecho, esta información se preveía muy importante para el progreso seguro de las excavaciones y poder garantizar que el nivel de agua siempre estuviera por debajo del nivel de excavación (por lo menos 0.50m). Los resultados del programa de instrumentación se presentan más adelante en la sección de comportamiento.

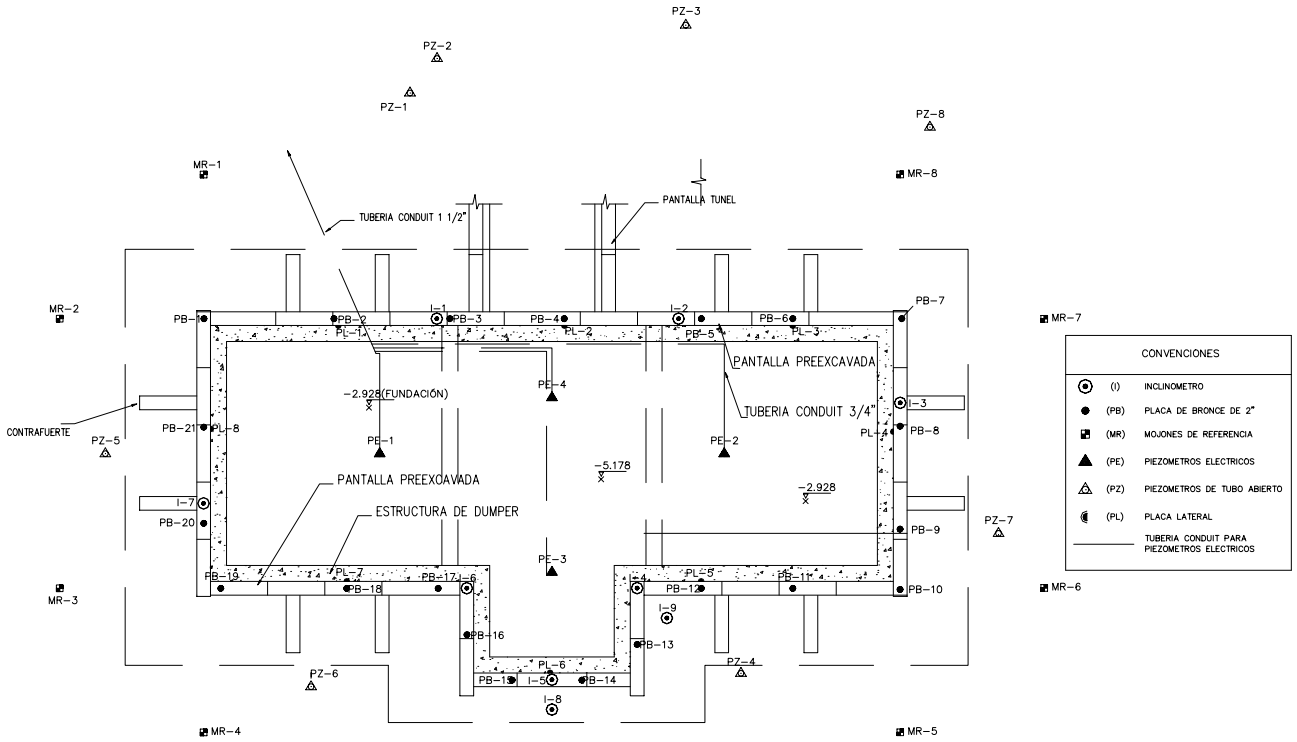

Figura 10. Sistema de instrumentación: inclinómetros, taches y piezómetros

CONSTRUCCION

Secuencia de Excavación. El proceso constructivo del “car-dumper” y el túnel contempló una serie de actividades interelacionadas que requerían de un control permanente, especialmente lo relacionado con el abatimiento del nivel freático. La construcción se llevó a cabo entre el 15 de febrero y el 15 de agosto de 2001, por el Consorcio H.L. Ingenieros S.A. – Equipos, Andamios y Encofrados S.A.; a continuación se presenta un resumen de la descripción de las actividades desarrolladas.

En primera instancia se realizó la prueba de bombeo requerida para ajustar el sistema de pozos de profundos de bombeo, simultáneamente se construían las paredes de guía necesarias para la construcción de la pantalla preexcavada. Finalizada la prueba de bombeo, se realizó otra prueba comprobatoria, se revisaron y ajustaron los cálculos y se procedió con la excavación y construcción de la pantalla preexcavada de 18m de profundidad y la construcción e instalación de 16 pozos de bombeo, tanto para el “car-dumper” como para el túnel. Una vez terminada la pantalla, se procedió con la demolición de las paredes guías y con la construcción de la viga cabezal perimetral a nivel superficie, con sección de 1.5x3.0m, sólo para el “car-dumper”. Con la construcción de la viga cabezal se inició la excavación del cajón por etapas hasta los niveles que lo permitiera el abatimiento del nivel freático, e interrumpiendo en el nivel +3.409m (a 5.591m de profundidad) para construir la viga perimetral intermedia con sección 1.0 x 0.7m y después en el nivel – 2.928m (a 11.928m de profundidad) para construir la viga cinturón de sección 1.3 x 1.0m con cuatro (4) codales transversales de concreto con sección de 1.3 x 0.6m; estructura importante para garantizar la estabilidad estructural, al quedar la pantalla apoyada en esta estructura y la viga cabezal. Con la construcción de los elementos anteriores, se construyó la losa de fondo y se hincó una pantalla de tablestacas de 6m de profundidad, hasta el nivel –8.00m.s.n.m (a 17.00m de profundidad) a lo largo del cárcamo de acceso al túnel, para permitir llevar a cabo una excavación

de 5m de profundidad, en la zona más crítica desde el punto de vista abatimiento del nivel freático, puesto que el sistema de bombeo no alcanzaba a abatir el N.F. sino hasta el nivel – 2.50m.s.n.m. (promedio, 11.5m profundidad) por fuera de la pantalla preexcavada; sin embargo, por dentro de la pantalla preexcavada, el abatimiento registrado promedio fue hasta el nivel –5.60m.s.n.m. equivalente a una profundidad de 14.60m, teniendo en cuenta que en la zona del cárcamo se disminuirá el gradiente hidráulico en primera instancia, debido a presencia de las pantallas preexcavadas y de tablestacas, y en segunda instancia, a la construcción de dos pozos de bombeo adicionales en la zona del cárcamo. La excavación del cárcamo se llevó hasta el nivel – 6.00m.s.n.m. (15.0m de profundidad) donde se colocó un piso en bolsacreto de 0.25m de espesor para controlar filtraciones y subpresión, y permitir por lo tanto, la construcción posterior de la placa y paredes del cárcamo. La excavación del túnel se llevó a cabo sin contratiempos, colocando los codales metálicos de acuerdo con los diseños.

Paralelamente con el desarrollo de las actividades en el cárcamo, se avanzó con la construcción de los concretos de segunda etapa, consistentes en la pared estructural de 0.7m de espesor y los apoyos – ménsulas para los equipos electromecánicos y de más necesidades operativas del "car-dumper"; por otra parte, se construyó el túnel.

Prueba de Bombeo. Esta actividad se llevó a cabo durante el 13 y el 16 de febrero de 2001, utilizando el pozo 9 (ver Figura 1, B-9). Con base en el diseño, la perforación del pozo fue de 18" y hasta una profundidad de 18.5m; se colocó una rejilla de 10" No. 30 en los últimos 3.0m y se empleó una bomba sumergible con 25HP de potencia con un caudal promedio de 5.0lt/seg, contra 10lt/seg que fue el de diseño. No fue posible incrementar el caudal ya que el pozo se ahogaba. Para conocer los niveles de abatimiento se emplearon los piezómetros PZ-1, 2, 3 Y 4, cuya localización se muestra en la Figura 10. Los resultados de la prueba, cuyos cálculos y experiencias son objeto de otro artículo, indicaron que por haber colocado la rejilla únicamente en los últimos tres (3) metros del pozo, no se aprovecharon los otros estratos permeables localizados a diferentes profundidades, lo anterior se explica también por el hecho que el pozo se secaba con un bombeo del 50% del diseño, obteniéndose un abatimiento de máximo 2.73m y una permeabilidad (k) de $6.5x10^{-4}$m/seg. Por esta razón se programó una prueba comprobatoria con un nuevo pozo pero ranurado en toda su longitud, la cual se llevó a cabo entre el 28 de febrero y el 1 de marzo de 2001.

Con la prueba comprobatoria se obtuvo una permeabilidad (k) de $5.5x10^{-4}$ – $6.5x10^{-4}$m/seg, se bombeó con un caudal promedio de 11.30 lt/seg y se obtuvo un abatimiento en el pozo de 2.55m; con la anterior información se revaluó el modelo hidráulico del diseño del sistema de bombeo y se concluyó que todos los pozos deberían de ir con rejilla en toda su longitud y que con el efecto del trabajo en grupo se podría conseguir el abatimiento de los 15m en los límites de la pantalla. Sin embargo, era necesario contemplar de todas formas la posibilidad de construcción de pozos adicionales, si el abatimiento no se obtenía durante construcción. El diseño final de los pozos consistió en una tubería perforada para filtro PVC 8", ranura No. 18 (1.00mm), ranurada de techo a piso en una longitud de 18.0m, recubriendo esta tubería se colocó un filtro de gravilla de diámetro exterior 18".

Pantalla Preexcavada y Soporte. La pantalla y su soporte se construyó en general sin contratiempos, empleando el método secuencial de panel primario – secundario, con longitudes de panel usual de 2.5m y en algunos casos de 5m para completar tramos de pantalla. Construidas las paredes guías, se dimensionaron primero las esquinas y los contrafuertes con la secuencia mostrada en la Figura 11, tanto para el "car-dumper" como para el túnel. El lodo empleado para estabilizar la excavación temporal de los paneles fue polímero; una vez completada la excavación de un panel primario se procedía a la excavación de las juntas consistentes de dos tubos de PVC

de ϕ 6” en el centro y uno de ϕ 4” en cada extremo, posteriormente, se procedía a la colocación de la canasta de acero de refuerzo de 18m de longitud para continuar con el vaciado de concreto utilizando el método “tremie”; en las Fotos 1 y 2 se muestran aspectos generales de la construcción de la pantalla.

Tal y como se mencionó en secciones anteriores y como se muestra en la Figura 6, el sistema de soporte del cajón fueron las vigas perimetrales y los codales en concreto de la viga cinturón inferior, que se construyeron en la medida en que avanzaba la excavación; para el caso del túnel se emplearon los codales metálicos, teniendo en cuenta que la pantalla no hacía parte de la estructura definitiva y que una vez construido el túnel, se rellenaba el espacio entre éstas, las Fotos 3 y 4 muestran aspectos de la excavación y sistemas de soporte del túnel.

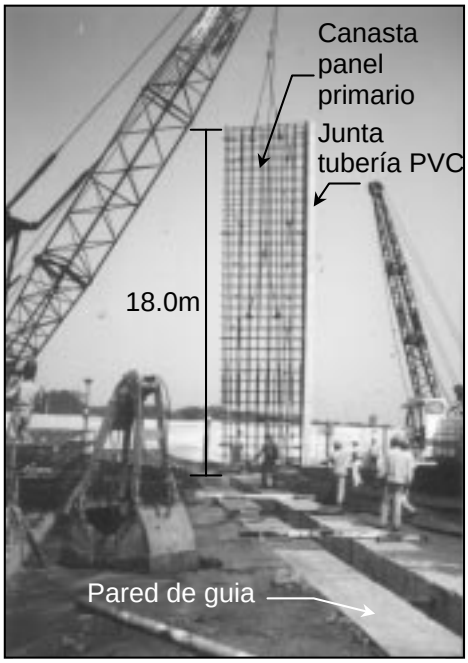

Foto 1. Pantalla preexcavada, Construcción

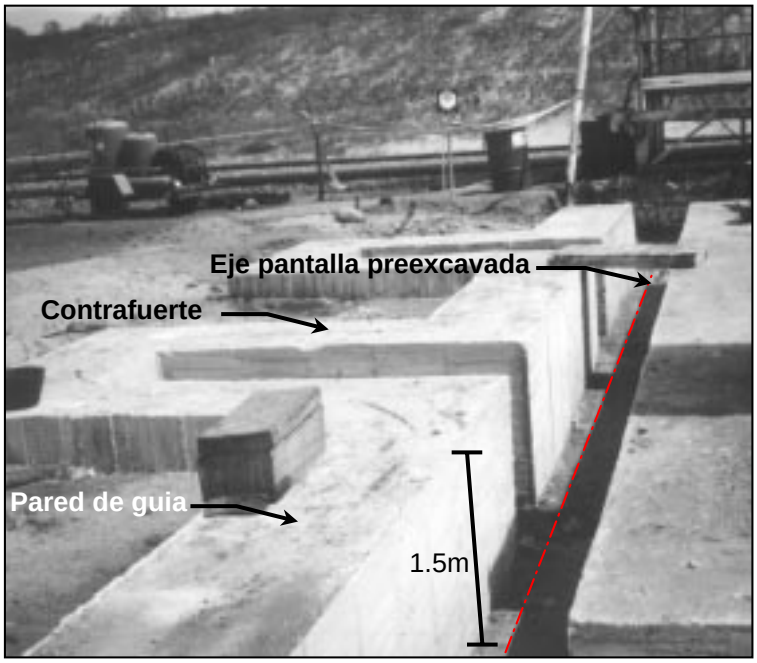

Foto 2. Pantalla preexcavada, contrafuerte y pared de guia

COMPORTAMIENTO

Abatimiento Nivel Freático. Esta actividad bajo cualquier punto de vista de análisis fue la más importante durante el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta la presencia de materiales granulares y su permeabilidad media a alta, lo cual generaba situaciones serias de filtraciones y ebullición si el sistema no operaba adecuadamente o si la pantalla presentaba deficiencias en su construcción. Inicialmente, se construyeron 16 pozos, con los cuales fue posible bajar el nivel freático en promedio hasta una profundidad de 7.0m, lo cual se lograba ajustando los caudales en cada bomba sin que se secara el pozo o pozos, porque inmediatamente dejaba de operar la bomba y el nivel se subía enseguida. Era una labor de supervisión y control muy dispendiosa, la cual se verificaba con los niveles tomados de los piezómetros. Los caudales estimados oscilaron entre 6.5 y 10lt/seg; en la Foto 5 se muestra la descarga de tres pozos llegando a una caja de inspección.

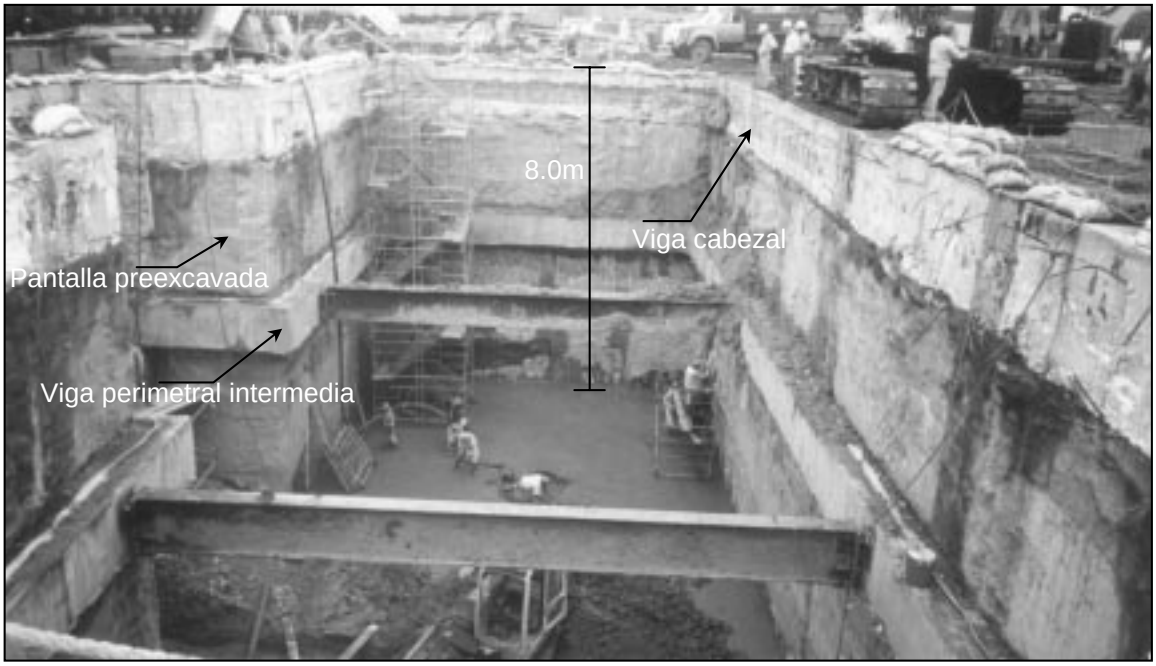

Foto 3. Excavación “Car dumper”

Foto 4. Excavación Túnel

Debido a filtraciones moderadas que ocurrían en el túnel y a la necesidad de bajar más el N.F. en el cajón fue necesario construir dos (2) pozos perimetrales adicionales y dos (2) más en el cárcamo del túnel, como se muestra en la Figura 11. En resumen, fue posible bajar el N.F. promedio hasta la cota + 1.0 m.s.n.m. (a una profundidad de 8.0m) como se muestra en los registros resumidos en la Figura 12; a pesar de no alcanzar la profundidad de abatimiento diseñada, fue posible la excavación del cajón al canalizar todas las filtraciones en un punto bajo del cárcamo del túnel y gracias a la instalación de bolsacretos bajo la placa del cárcamo del túnel. Cabe anotar que se presentaron muchos inconvenientes en la calibración del sistema de bombeo, debido a la interrupción del funcionamiento de algunas bombas por fallas mecánicas o eléctricas; casi en ningún momento se tuvo el sistema trabajando al 100% de su capacidad instalada.

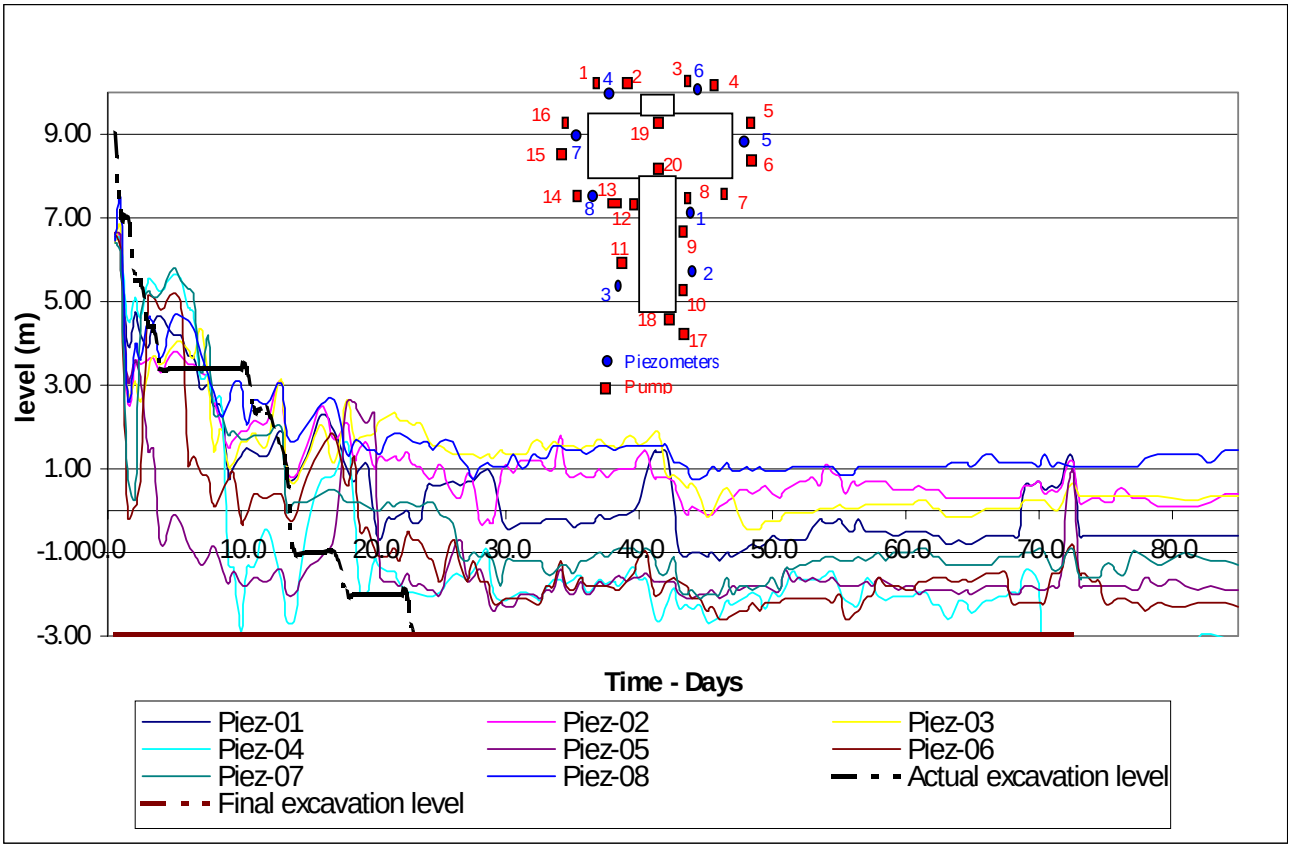

Figura 11. Sistema final de bombeo y registros de abatimientos del N.F.

Como aspecto relevante para justificar el sistema de desecación en casos de depósitos granulares, se menciona una situación de filtraciones que se presentó en el costado hacia la vía férrea (Costado NW, cárcamo túnel, ver Figura 10) en donde la pantalla quedó con zonas sin concreto, generando filtraciones importantes; a pesar de la existencia de las bombas B-2 y B-3, fue necesario inyectar la zona con lechada y mortero para disminuir las filtraciones y poder continuar con la excavación; inclusive, fue también necesario complementar la actividad de inyecciones con la colocación a mano de sacos de arena – cemento en las cavidades de la pantalla.

Movimientos de la Pantalla. Los movimientos presentados en la pantalla, especialmente durante la excavación del cajón, definitivamente fueron muy bajos al igual que la tasa con que ocurrían, corroborando el buen trabajo del sistema de vigas de soporte, las cuales en la medida en que eran construidas, controlaban los movimientos. En la Figura 12 se muestra un registro tipo del

inclinómetro que mostró mayores movimientos; como se observa, las máximas deformaciones horizontales fueron de 10.0m.m. y cesaron una vez completados los soportes y la construcción de los concretos de segunda etapa. La información registrada por los taches no fue representativa, ya que la precisión de los aparatos topográficos no permitía medir las deformaciones tan bajas.

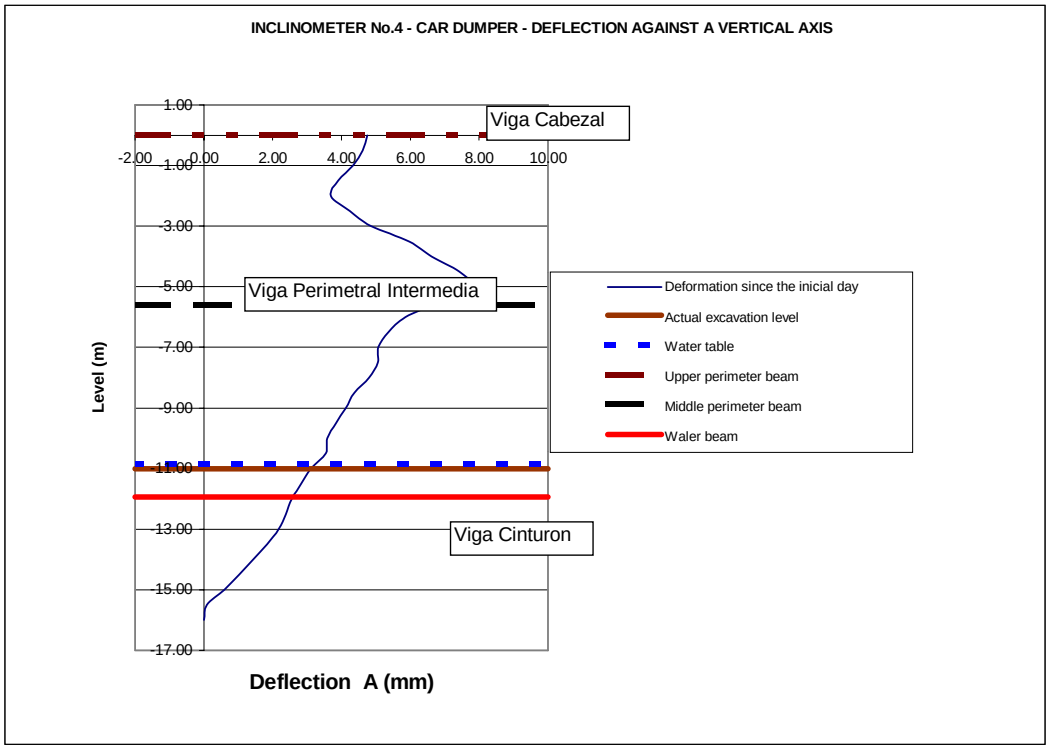

Figura 12. Registro típico de un inclinómetro

Foto 5. Bombeo pozos y tanque bombeo final

CONCLUSIONES

- El sistema de pantalla preexcavada de 18m de profundidad en arenas, soportando los paneles excavados temporalmente con lodo de polímero, fue adecuado y se llevó a cabo sin contratiempos, con buenos rendimientos y calidad.

- El sistema de soporte con vigas perimetrales tipo “marco” y codales de concreto al nivel de la losa de fondo del cajón, resultó benéfico al compararlos con sistemas convencionales de codales metálicos y tendones de anclaje. La solución permitió buen espacio de trabajo para excavar, seguridad durante construcción, control de deformaciones (más rígido el sistema) y menores costos.

- Definitivamente en excavaciones en depósitos granulares como el del proyecto del “car-dumper”, el control del abatimiento del N.F. es primordial para la ejecución segura de las excavaciones; el no abatir el N.F. por una parte, conllevaría a un sistema de soporte prácticamente imposible de construir debido a la gran capacidad requerida para soportar presiones laterales muy altas, por otra parte, los controles de filtraciones dentro del cajón serían ineficientes para manejar el fenómeno de ebullición.

- Los sistemas de desecación tienen que ser modificados y probados antes de iniciar las excavaciones; es conveniente considerar un mayor número de pozos y mayor profundidad a aquellos obtenidos en los diseños.

- Teniendo en cuenta que las deformaciones horizontales de la pantalla durante la excavación fueron bajas, inferiores a 10m.m., se puede concluir que el comportamiento correspondió al de una estructura rígida bajo una condición Ko.

- Finalmente, la hipótesis inicial de considerar el depósito granular homogéneo desde el punto de vista permeabilidad (k) no fue representativo puesto que los estratos limosos tenían permeabilidades mas bajas; con la ejecución de la prueba de bombeo se ajustó el sistema y se modificó la longitud de rejilla, de 3.0m a 18.0m (toda la longitud del pozo).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer especialmente a la Drummond Limited, por haber permitido y colaborado en la ejecución del artículo; al igual que a Equipos, Andamios y Encofrados S.A. y H.L. Ingenieros S.A., por la confianza brindada durante la ejecución de los diseños e instrumentación del proyecto. También expresan y resaltan la colaboración del personal de C.I.C. incluyendo al Ing. Angel Horacio Avila por la elaboración de las figuras, el señor Diego Pardo por la transcripción del texto y paciencia mostrada en las correcciones, y el Aux. Victor A. Cortés por su colaboración en la edición final.

REFERENCIAS

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1997), “Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente – NSR-98”.
- Cedegren, H.R. (1977); “Seepage, Drainage, and Flow Nets”, Second Edition, Wiley Interscience.

- Dupuit, J. (1854); “Traité Theorique et Practique de la Conduite et de la Distribution des Eaux”.
- Forchheimer, ph (1949); “Grundwasserbewegung – Hydraulik Teubner”.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1982); “Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquakes”, Earthquake Engineering Research Institute, California.
- Sowers, G.F. (1979); “Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering; Fourth Edition, Macmillan Publishing Co., Inc.

No copiar