

EXCAVACIÓN DEL EDIFICIO ATLANTIS PLAZA

Por: Ing Carlos Restrepo - Ing Andrea Yunda

El Centro de Entretenimiento ATLANTIS PLAZA ubicado entre las calles 80 y 81 entre las carreras 12 y 13 fue construido en el año 1999, en un lote de aproximadamente 7000 m² de área, con un área de construcción total de 46000 m².

La zona de ubicación del proyecto se encuentra caracterizada por suelos arcillosos particularmente blandos dada la antigua presencia de lo que se denominaba el Lago Gaitán y sus zonas aledañas, en un vecindario ya consolidado de edificios hasta de 6 pisos cimentados de acuerdo con la época en que fueron construidos, cada uno de ellos mediante cimentaciones superficiales los más antiguos hasta elementos profundos los más recientes o por casas de dos pisos de más de 30 años de construidas y cimentadas mediante elementos corridos apoyados superficialmente.

El proyecto se diseñó con una altura de su superestructura equivalente a 6 pisos, altillo y cubierta con un total de 4 sótanos dado el requerimiento de 505 parqueos determinados por la firma diseñadora como los mínimos necesarios dadas las características del proyecto. Adicionalmente y generando un corte mayor a los 4 sótanos se proyectó un tanque de agua que ocupaba la mayor parte de la planta de la edificación para una excavación total de 17.0 m, corte que dada la consistencia muy blanda del suelo así como sus características geomecánicas muy pobres, hicieron especialmente interesante el proyecto desde el punto de vista geotécnico.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.-

El edificio se construyó en estructura convencional con luces entre ejes de columnas entre 5.0 m y 10.0 m, generando cargas a nivel de cimentación hasta de 970 toneladas, de acuerdo con los planos definitivos de cimentación que se ilustra a continuación:

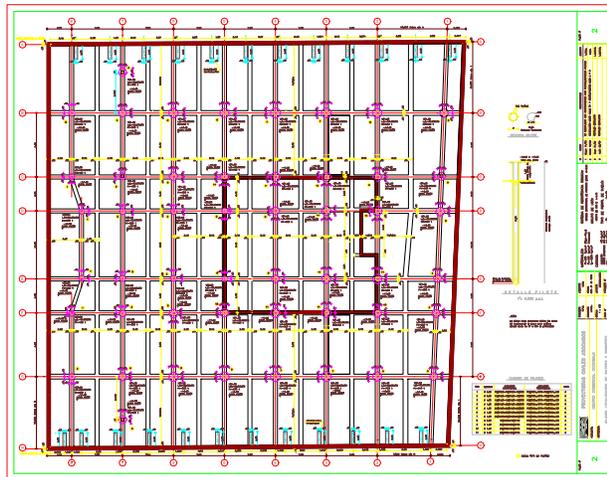


Figura No. 1. Planta de cimentación

Así mismo, a continuación se incluye un corte del proyecto, de donde se tiene una excavación total hasta de 17.0 m, distribuidos así:

Nivel	Cota de excavación (m)
1er sótano	-4.15
2º sótano	-7.45
3er sótano	-10.75
4to sótano	-14.05
tanque	-17.0

INVESTIGACION DEL SUBSUELO

Con el objeto de establecer las características geomecánicas del subsuelo se efectuaron un total de 6 perforaciones hasta de 50.0 m de profundidad utilizando para el efecto un equipo de percusión y lavado. De acuerdo con los resultados de la investigación del subsuelo se determinó que los suelos del proyecto estaban conformados típicamente por depósitos de origen lacustre pertenecientes a la formación SABANA la cual está compuesta en este caso en particular en sus primeros 39.0 m por suelos arcillosos muy blandos que anteceden estratos granulares de mayor densidad pero que en todo caso presentan algunas intercalaciones de arcillas de consistencia ligeramente más firme. La figura No.2 ilustra la estratigrafía típica del lote.

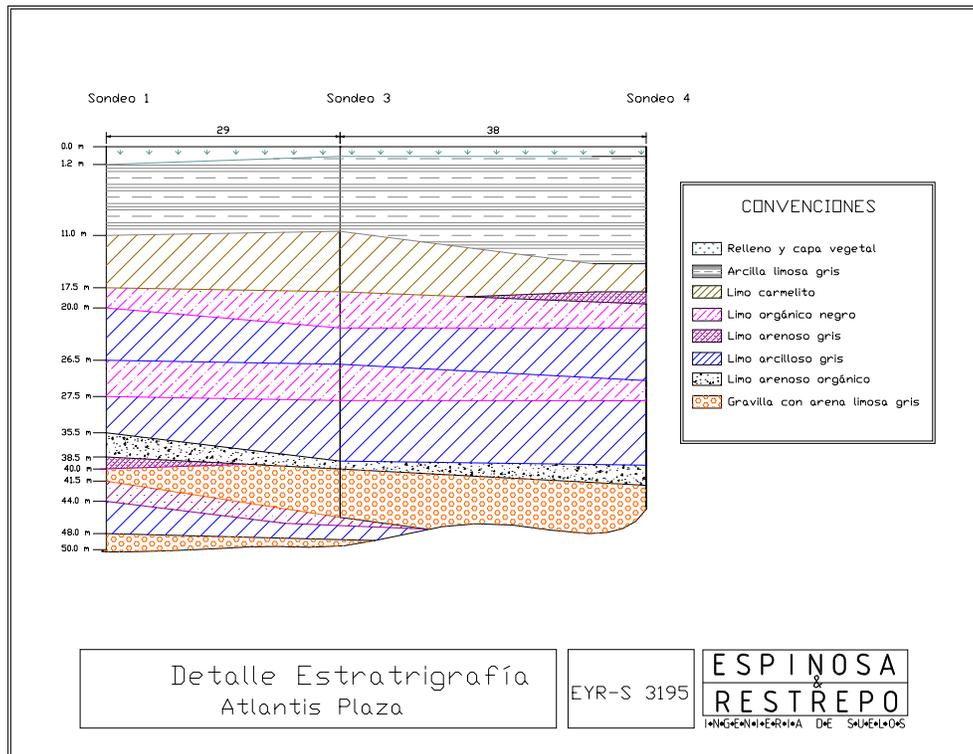


Figura No. 2. Perfil estratigráfico

A lo largo de las perforaciones se realizaron ensayos de penetración estándar como medida de la densidad de mantos granulares e índice de la consistencia de los suelos arcillosos encontrados; adicionalmente se midió la resistencia al corte de los mantos netamente arcillosos mediante pruebas con penetrómetro manual y ensayos de compresión inconfiada in-situ. Finalmente se tomaron suficiente muestras alteradas para inspección visual e inalteradas en tubos de pared delgada para enviar al laboratorio.

A partir de los ensayos de campo, se graficaron los valores corregidos de N en función de la profundidad así como los valores de resistencia al corte obteniendo lo siguiente:

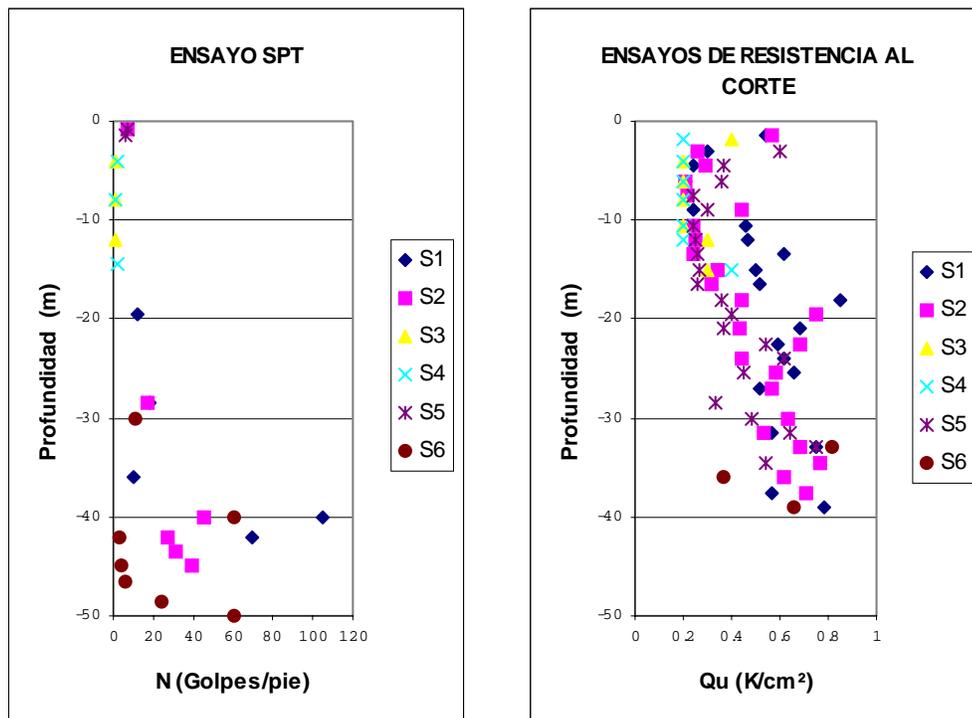


Figura No. 3. Ensayos de Penetración estándar y resistencia al corte en función de la profundidad. Nótese la baja consistencia de los suelos arcillosos en los primeros 40.0 m de la estratigrafía los cuales se varían de normalmente consolidados a subconsolidados aun en las cercanías de los estratos granulares dadas las cabezas subartesianas detectadas en estos últimos.

En cuanto al régimen de aguas subterráneas y como producto del programa de instrumentación implementado en la obra (el cual se menciona más adelante) se encontraron dos niveles piezométricos claramente diferenciados. El primero presente en las arcillas superficiales y estable a una cota de -1.0 m y el segundo una tabla subartésiana presente dentro de los mantos granulares y estable a los $3.0/3.50$ m. Es importante anotar que las aguas subartesianas han garantizado una condición de subconsolidación ligera en las arcillas que la anteceden al garantizar un gradiente piezométrico inverso.

ENSAYOS DE LABORATORIO

Con el fin de determinar las propiedades esfuerzo-deformación de los suelos y sus parámetros físicos y así poder establecer modelos de comportamiento, se efectuaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Pruebas triaxiales CU
- Compresiones inconfiadas
- Granulometría
- Humedad natural
- Límites de Atterberg
- Pesos unitarios

Con base en los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados, a continuación se ilustran los parámetros físicos en función de la profundidad notando contenidos de humedad generalmente muy altos (entre 143.48 y 128.7 %) en los mantos de arcillas blandas que disminuyen a mayor profundidad coincidiendo con los estratos granulares (valores inferiores a 16.15%).

Adicionalmente se tienen valores muy altos, hasta del 328%, correspondiente a los lentes orgánicos detectados a 30.0 m de profundidad.

A continuación se ilustran las propiedades índice del suelo junto con los valores de resistencia al corte del suelo de donde se tiene lo siguiente:

- Contenidos de humedad altos y cercanos al límite líquido del suelo en las arcillas blandas que anteceden los estratos granulares
- Contenidos de humedad iguales al límite líquido del suelo en los lentes orgánicos y turba de consistencias muy blanda a 30.0 m de profundidad.
- Contenidos de humedad bajos a partir de 39.0 m de profundidad en donde inician los estratos granulares.

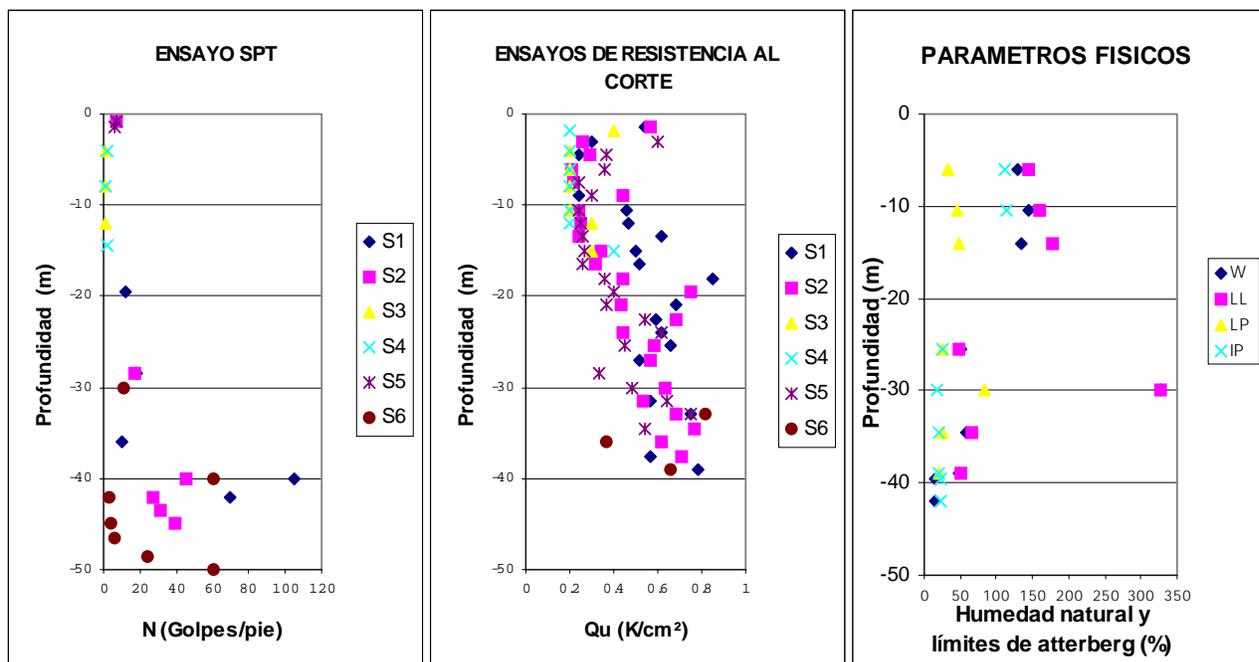


Figura No. 4. Gráficas de parámetros físicos.

Del ensayo triaxial CU realizado, a continuación se ilustran los diagramas obtenidos. Se debe anotar que el ensayo se realizó para una presión de cámara equivalente al estado de confinamiento actual de la muestra, producto de una columna de suelo de 14.0 m de altura y dos presiones de cámara adicionales por encima y por debajo de este valor para obtener la envolvente del modelo Mohr-Columb, variando el esfuerzo axial aplicado. Producto del ensayo se obtiene un material con una resistencia al corte a dicha profundidad de 0.60 Kg/cm² con un ángulo de fricción de 10 grados que denota un material de consistencia blanda. Se debe anotar que la forma de las curvas indican que las arcillas se encuentran normalmente consolidadas. Adicionalmente del ensayo se pudo obtener el Módulo de Young calculado al 50% de la carga de falla equivalente a 60 Kg/cm².

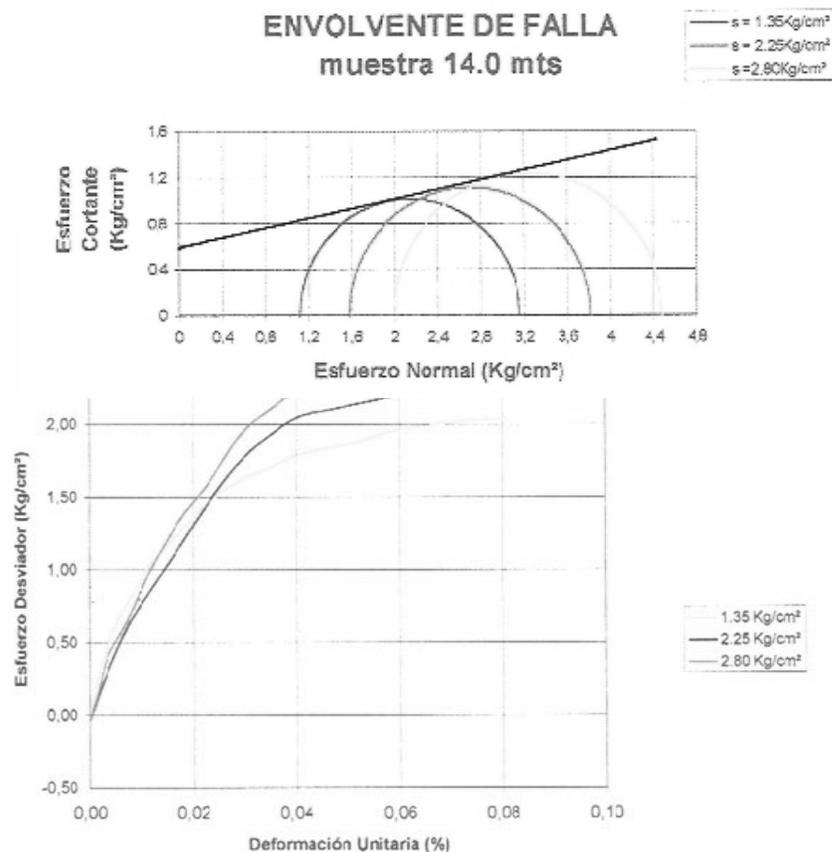


Figura No. 5. Curvas obtenidas del ensayo triaxial realizado a una muestra de suelo que se obtuvo a 14.0 m de profundidad.

Finalmente y con base en la información de campo y laboratorio, se determinaron los módulos elásticos del suelo a partir de los siguientes criterios establecidos en la literatura y/o utilizados por esta oficina a lo largo de su trayectoria:

A partir de los valores de penetración estándar (*Joseph Bowles*):

$$E_{\text{arcillas}} = 300(N+6) \text{ [ksf]}$$

$$E_{\text{granulares}} = 1200(N+6) \text{ [ksf]}$$

A partir de los valores de resistencia al corte (*Joseph Bowles*):

$$E = 200 * C_u$$

A partir de correlaciones establecidas por EYR y la curvas del código Polaco.

Los módulos obtenidos para diferentes estratos en función de la profundidad y de acuerdo con los criterios anteriormente establecidos se ilustran a continuación:

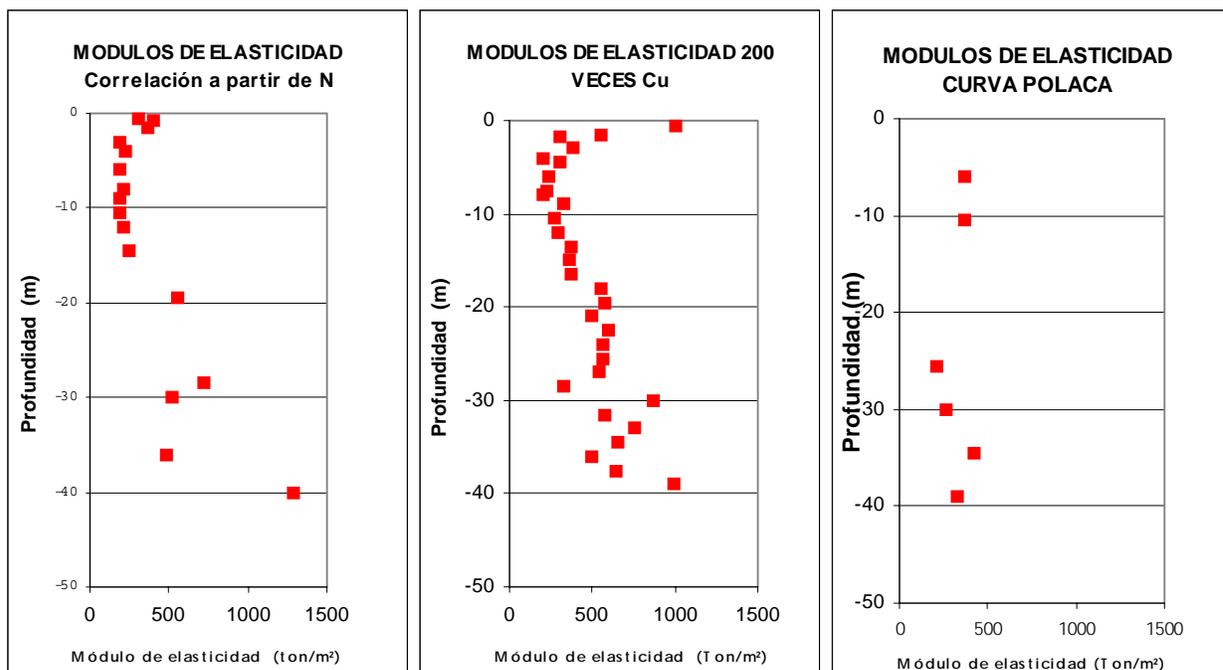


Figura No. 6. Determinación del modulo de elasticidad en suelos arcillosos

Con base en las gráficas anteriores se puede establecer una tendencia en los módulos elásticos del suelo con valores inicialmente altos asociados a la preconsolidación superficial del suelo, seguidos por módulos bajos típicos de las arcillas normalmente consolidadas y una reducción en los módulos dados los lentes orgánicos y con turba detectados a los 30.0 m de profundidad.

De las gráficas también se observa un incremento hacia los 40.0 m de profundidad en donde inician los estratos granulares. Los módulos obtenidos en dichos mantos y por efectos de escala se ilustran de manera independiente en la siguiente gráfica:

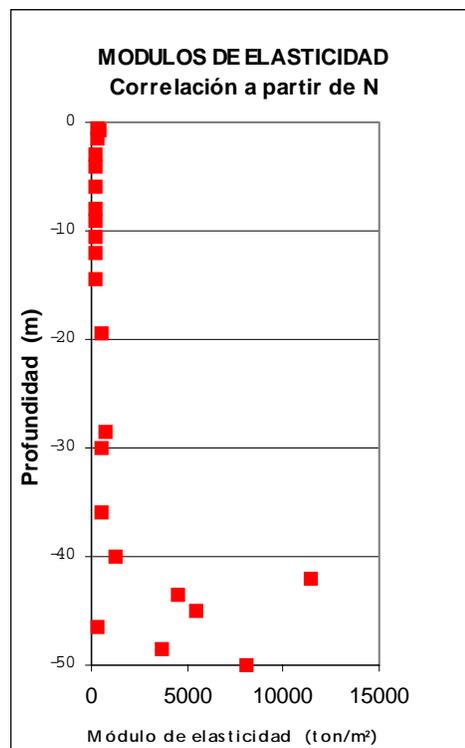


Figura No. 7. Determinación del modulo de elasticidad en suelos granulares

A continuación se establece un cuadro resumen con los valores de compresión inconfiada y módulos de elasticidad para las diferentes cotas de las perforaciones realizadas.

Estrato	Profundidad (m)	N prom golpes/pie	Qu (Kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (T/m ²)
1	0 - 1.50	6	0.78	567
2	1.50 - 16.50	1	0.30	289
3	16.50 - 28.0	12	0.55	475
4	28.0 - 31.0	14	0.33	283
5	31.0 - 38.0	10	0.67	515
6	38.0 - 40.0	36	1.00	625
7	40.0 - 45.0	53	---	5,690
8	45.0 - 48.5	5	0.50	336
9	48.50 - 50.0	42	---	5,873

Tabla No. 1. Resumen de propiedades físicas y geomecánicas

ANÁLISIS Y DISEÑOS GEOTECNICOS

Con el objeto de dar respuesta adecuada a las dificultades del proyecto se establecieron los siguientes aspectos geotécnicos a resolver:

- a) Cimentación de cargas verticales
- b) Excavación
 - i- Manejo de la falla de Fondo.
 - ii- Soporte lateral de los cortes para minimizar las deformaciones horizontales.
 - iii- Manejo de aguas subterráneas.
 - iv- Proceso Constructivo y de excavación.

Dichos aspectos se revisan brevemente a continuación:

a) Cimentación de cargas verticales:

Con el objeto de dar apoyo a las cargas verticales del proyecto las cuales de acuerdo con el diseño estructural alcanzan valores que podría variar entre las 160 y 970 toneladas se utilizaron pilotes circulares hasta de 1.50 m de diámetro y profundidades entre 45.0 m y 49.0 m apoyados sobre los mantos granulares que aparecen desde los 39.0 m dando adecuado empotramiento a los pilotes en dichos mantos. Con el objeto de dar viabilidad al proceso constructivo que se describirá más adelante se estableció la necesidad de disponer un solo pilote por columna localizado de manera concéntrica con la columna.

A continuación se incluye un cuadro con las capacidades típicas de los pilotes evaluadas a partir de modelos de esfuerzos efectivos.

Diam (mts)	0.80	0.90	1.0	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
Carga (ton)	250.0	350.0	400.0	500.0	610.0	720.0	900.0	970.0

Tabla No. 2. Cuadro de capacidades de pilotes

b) Excavación

i- Manejo de la falla de fondo.

Dadas las características de resistencia al corte de los suelos la excavación proyectada de 17.0 m de profundidad, los factores de seguridad a la falla de fondo se encuentran por debajo de la unidad para cortes mayores al primer sótano. A continuación se incluyen los factores de seguridad:

Cota	F.S. Falla de Fondo
1er sótano	1.23
2do sótano	0.89
3er sótano	0.70
4to sótano	0.57

Tabla No. 3. Factores de seguridad a la falla de fondo

Por lo anterior el diseño debería contemplar un mecanismo para confinar los suelos arcillosos de manera que suspenda el flujo plástico de las arcillas por dicho fenómeno.

Como solución para el manejo de la falla de fondo se estableció la necesidad de utilizar un sistema de pantallas de concreto reforzado, pre-excavadas y fundidas in-situ de 41.0 m de profundidad construidas con un empotramiento mínimo de 2.0 m dentro de los estratos granulares de mayor densidad. Finalmente se diseñó una losa de fondo capaz de soportar esfuerzos de subpresión.

Las fotografías No.1 y 2 ilustran el proceso de excavación y fundida de los pilotes.



Fotografías No. 1 y 2. Excavación y fundida de pilotes. Se observa máscara de instalación de las columnas metálicas

ii- Soporte lateral de los cortes.-

Utilizando las pantallas pre-excavadas descritas en el numeral anterior y con el objeto de darle la rigidez necesaria a los elementos de concreto se estableció un espesor de pantallas de 0.50 m para los linderos con vecinos no construidos (vías). Con respecto a los linderos construidos y con el objeto de rigidizar las pantallas y de esta manera minimizar las deformaciones horizontales se recomendó la disposición de contrafuertes fundidos de manera monolítica a la pantalla de 2.0 m de largo, 0.50 m de ancho dispuestos a lo largo de la pantalla con un espaciamiento de 5.0 m y fundidos entre las cotas -3.10 y -25.0 m.

Finalmente, dada la magnitud de los empujes horizontales totales sobre las pantallas, generados por diagramas de tipo uniforme y/o triangular cuyos valores se incluyen a continuación, se estableció la necesidad de apuntalar la pantalla a medida que se desarrolla la excavación con las placas correspondientes a cada uno de los sótanos.

Nivel	Empuje Hztal Máx (Ton/m ²)
1er sótano	8.35
2do sótano	11.03
3er sótano	15.75
4to sótano	18.00

Tabla No. 4. Empujes horizontales totales sobre las pantallas

iii- Manejo de Aguas Subterráneas.-

Teniendo en cuenta las consecuencias nefastas que sobre los vecinos podría tener un proceso de drenado de las aguas freáticas dados los altos contenidos

de vacíos en las arcillas superficiales (valores superiores a 4 de acuerdo con el programa de ensayos de laboratorio). Por tanto el manejo de las aguas freáticas se constituye en un parámetro crítico para el correcto comportamiento del proyecto. Con el objeto de mantener los niveles freáticos en la condición más estable posible, en conjunto con la estanqueidad recomendada se estableció un sistema de recolección de las aguas infiltradas y su posterior reinyección al suelo mediante un sistema de drenes dispuestos por detrás de las pantallas y compuestos por tubería de PVC perforada dispuesta de manera vertical dentro del suelo a lo largo de los linderos no construidos.

iv- Proceso Constructivo.-

Con el objeto de garantizar el comportamiento satisfactorio de la excavación y dado el estrecho programa de trabajo impuesto por las necesidades comerciales del proyecto se estableció un sistema constructivo mediante el cual de manera simultánea con la construcción de las pantallas y los pilotes, se dejaron instaladas columnas metálicas correspondientes a los niveles de sótanos dentro del proceso de excavación y fundida de los pilotes.

Para el efecto se dispuso en el diseño que cada columna estaría cimentada mediante un único pilote de diámetro suficiente para trasladar el 100% de la carga vertical al subsuelo. Una vez excavado y fundido el pilote mediante sistema tremie, se dispone de una camisa y máscara de aproximación en la perforación en la altura no fundida (altura libre de sótanos) a lo largo de la cual se hinca por gravedad la columna metálica correspondiente a la altura de los sótanos. Una vez se tiene la columna en su cota final se fija para permitir el fraguado del concreto; una vez fraguado el pilote, se retira el aparataje de hinca de la camisa para finalmente llenar la columna en su parte interna con concreto de 4000 psi.

Teniendo en cuenta la condición de esbeltez que genera la columna sin el arriostramiento correspondiente generado por las placas de los sótanos los cuales aun no se han excavado, este elemento se confina lateralmente con un relleno fluido o mortero de baja resistencia vaciado en el espacio anular entre el perímetro de excavación del pilote y el cuerpo de la columna metálica. Dicho mortero es demolido a medida que se avanza la excavación y se apuntalan las columnas mediante las placas de sótano. Lo anterior garantiza el confinamiento lateral a lo largo de la altura libre de la columna durante el proceso.

Las fotografías No.3 a 5 ilustran el proceso constructivo descrito.



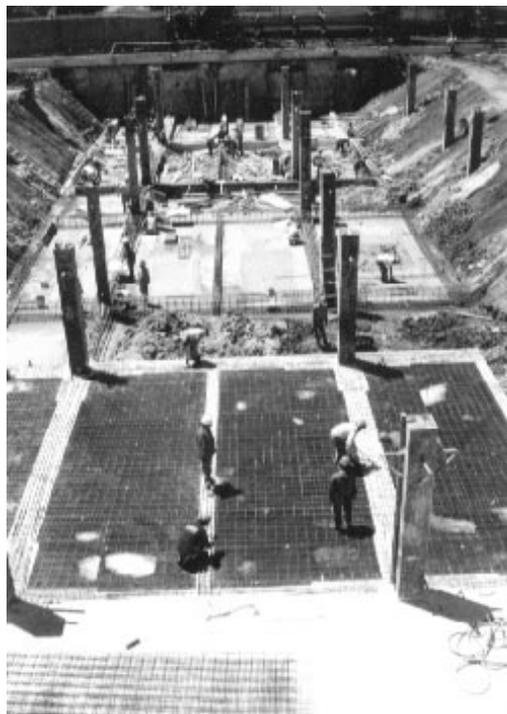
Fotografías No. 3 y 4. Colocación camisa e Instalación columna metálica.



Fotografía No. 5. Retiro camisa metálica. Nótese la columna metálica.

Una vez terminadas las labores de pilotaje y pantallas se inició la excavación del lote en su primer sótano a cielo abierto y por etapas para garantizar el comportamiento de las pantallas las cuales en esta primera etapa trabajarían en voladizo. Durante cada etapa se funde la placa de concreto de primer sótano correspondiente. (fotografía No. 6) Posteriormente y de manera similar para los sótanos 2 a 4 se procedió a efectuar una excavación en un total de 15 etapas por nivel conformadas por cuadros con dimensiones hasta de 15.0 m para los primeros niveles y de 8.0 m para el último sótano. Durante la ejecución de cada cuadro se efectuó la fundida de la correspondiente losa de concreto logrando el apuntalamiento de las pantallas en la zona respectiva y el confinamiento del fondo para controlar los rebotes excesivos.

Las fotografías No. 6 a 8 indican algunos aspectos generales de la excavación de los sótanos.



Fotografía No. 6. Excavación y fundida de la placa del Sótano -1. Nótese la ubicación de las columnas metálicas preinstaladas tanto en el fondo de la excavación como en las caras del talud



Fotografía No. 7. Detalle excavación sentido E-W, franja central. Obsérvese el vecindario consolidado con viviendas de 2 pisos.



Fotografía No. 8. Excavación costado norte Detalle excavación sentido E-W, franja central. Obsérvese el vecindario consolidado con viviendas de 2 pisos.

COMPORTAMIENTO FINAL Y RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACION GEOTECNICA

INSTRUMENTACION GEOTECNICA

Teniendo en cuenta las características muy blandas de los suelos en el sector y dada la complejidad misma de la excavación por su profundidad así como del

contexto urbano, se vio la necesidad de implementar un programa de instrumentación completo durante el proceso de excavación con el fin de monitorear permanentemente el comportamiento de la excavación como medida preventiva, tales como abatimiento de niveles freáticos, desplazamientos tanto verticales como horizontales así como los esfuerzos en los diferentes elementos estructurales involucrados en el proceso de excavación.

Con base en las dimensiones de la excavación tanto de proyección en planta como de profundidad se instalaron los siguientes elementos con sus correspondientes longitudes:

OBJETO	OBJETIVO ESPECIFICO	ELEMENTO	No. DE ELEMENTOS	LONGITUD	Exactitud de la lectura
Monitorear cabezas piezométricas	En arcillas	Piezómetro de tubo abierto	6	8.0/15.0 m	d/2 siendo d el diámetro de la tubería instalada.
	En mantos granulares profundos	Piezómetro de cable vibrátil	1	35.0 m	0.5% FS
Monitorear desplazamientos	horizontales en pantallas	Inclinómetros (*)	8	39.0 m	2 mm
	Verticales en el fondo de la excavación	Extensómetros (**)	3	39.0 m	.03 a 0.3 mm
	horizontales y verticales en diferentes puntos de la obra	Puntos de Topografía	60 puntos entre Niveletas y Platinas	^-----	3 a 5 mm por la raíz cuadrada de la distancia del punto de interés al BM
Monitorear esfuerzos	En elementos estructurales	Deformímetros	4	^-----	0.5%FS

Tabla No. 5. Elementos de instrumentación instalados

* 6 de los Inclinómetros se instalaron embebidos en las pantallas y 2 en el suelo y por detrás de las mismas.

** Se instalaron 2 arañas por extensómetro a profundidades entre 22.0 y 26.0 m.

- Las deformaciones horizontales producto de la excavación fueron monitoreadas mediante los inclinómetros instalados cuyas lecturas arrojaron un comportamiento bastante aproximado de los movimientos producto de la excavación. En la figura No. 8 se observa el efecto de los contrafuertes en las pantallas, el inclinómetro No. 2 se instaló en la pantalla con contrafuertes y el No. 4 en la pantalla sin contrafuertes.

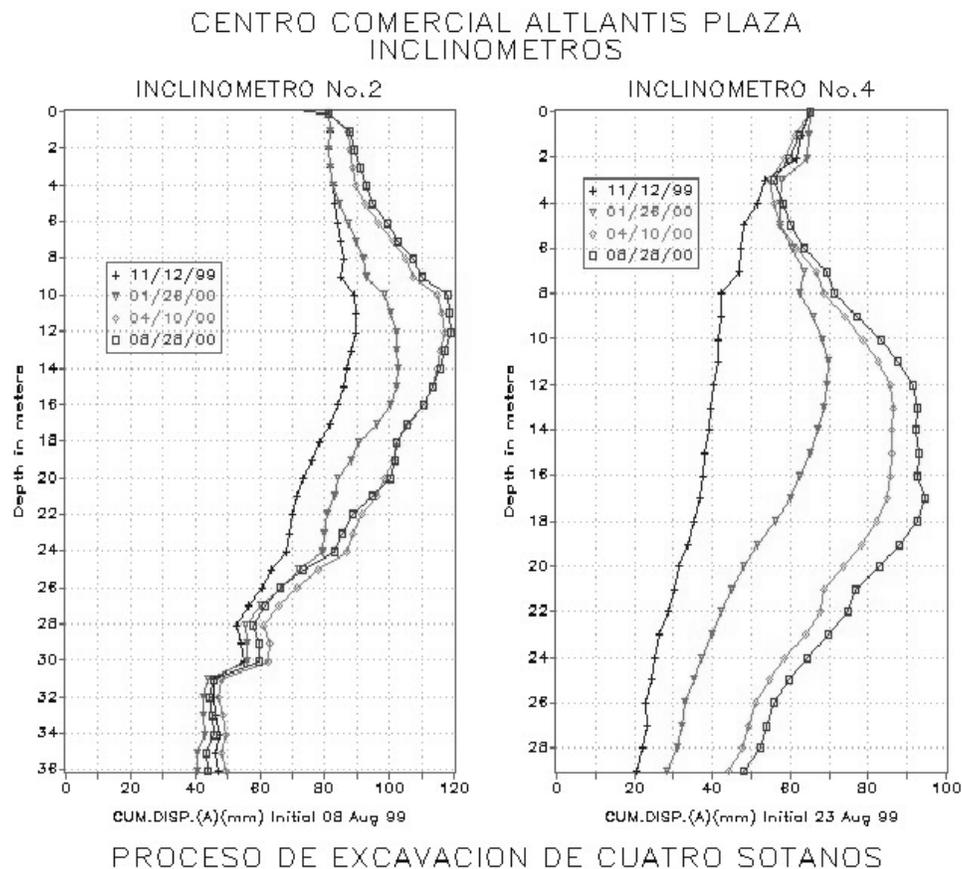


Figura No. 8. Gráficas de los inclinómetros instalados dentro de las pantallas. Se observa como la pantalla con contrafuertes (inclinómetro No. 2) presenta un comportamiento más rígido en la pata con una mayor transferencia de los empujes a la placa de los sótanos a través de los elementos de rigidez mientras que el suelo en pasivo se ve menos esforzado.

- Los niveles freáticos fueron monitoreados mediante piezómetros de tubo abierto y de cable vibrátil los cuales arrojan niveles estables dado el sistema de reinyección que se llevó a cabo durante la excavación. Dichos niveles se estabilizaron entre 1.0 y 2.50 m para los estratos arcillosos y alrededor de los 4.0 m para los mantos granulares. En la figura No. 9 se grafica el comportamiento estable de los niveles piezométricos de los diferentes mantos.

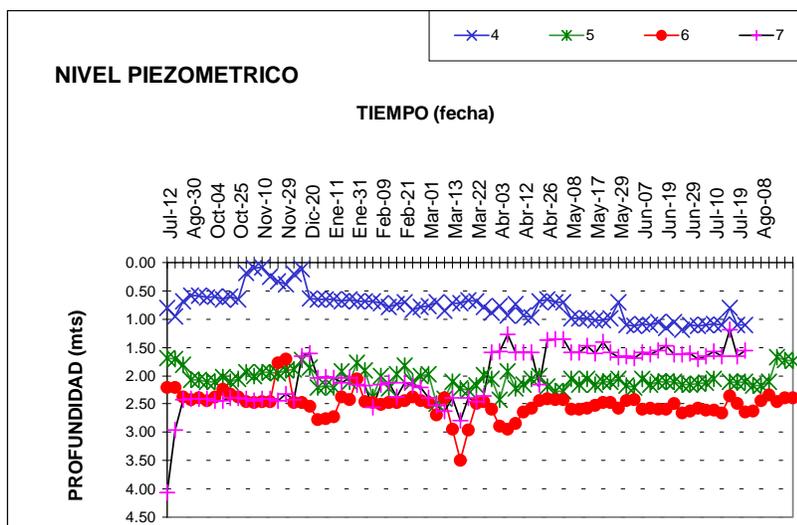


Figura No. 9a. Gráfica de los piezómetros de tubo abierto. Se observa un comportamiento estable gracias al sistema de reinyección implementado

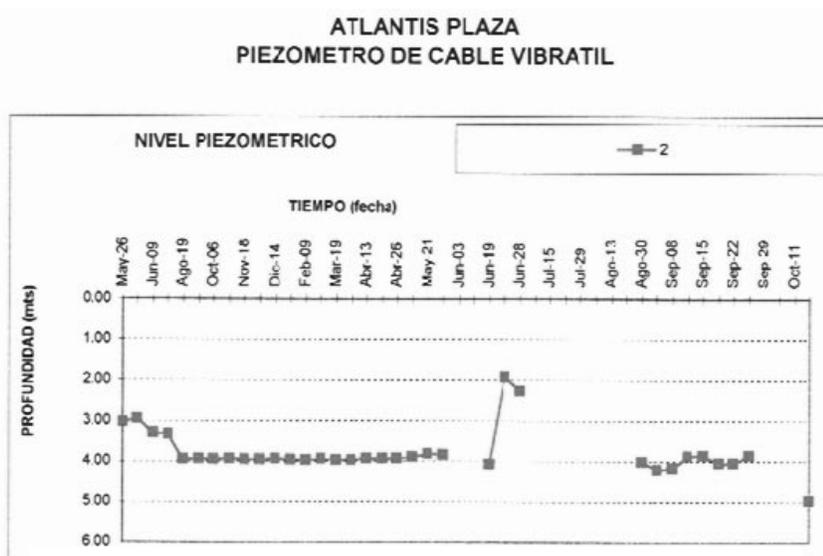


Figura No. 9b. Gráfica del piezómetro de cable vibrátil.

- Con el fin de verificar los esfuerzos axiales dentro de las vigas de las placas de los sótanos generados por los empujes de tierra, se dejaron instalados una serie de deformímetros embebidos en los elementos registrando su trabajo a compresión o a tracción de acuerdo con el estado de la excavación y etapas de fundida de los tramos de placa. En la figura No. 10 se ilustra el registro con el tiempo de los 4 elementos instalados.

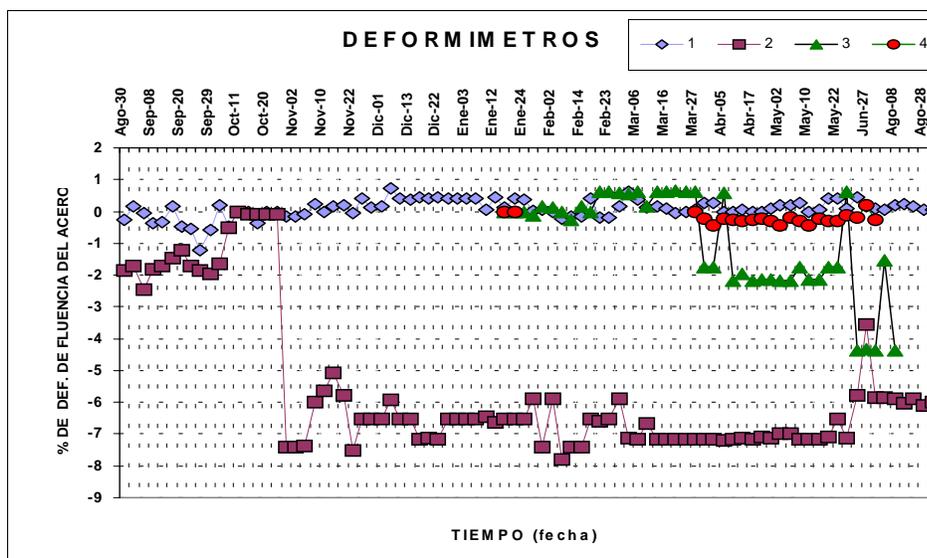


Figura No. 10. Deformímetros de cable vibrátil. Esta gráfica indica el nivel de esfuerzos como porcentaje del esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo en el cual están instalados; valores negativos indican elementos trabando a compresión y viceversa. Los elementos 1 y 2 se encuentran instalados en la placa primer sótano mientras que los elementos 3 y 4 se encuentran en las losas de 2do y 3er sótano. Gráfica del piezómetro de cable vibrátil.

- La condición de rebotes y flujo de fondo dada la profundidad alcanzada con la excavación fue monitoreada mediante extensómetros de arañas magnéticas dentro de la excavación. En la figura No 11 se ilustra el comportamiento de 1 de los elementos durante la excavación.

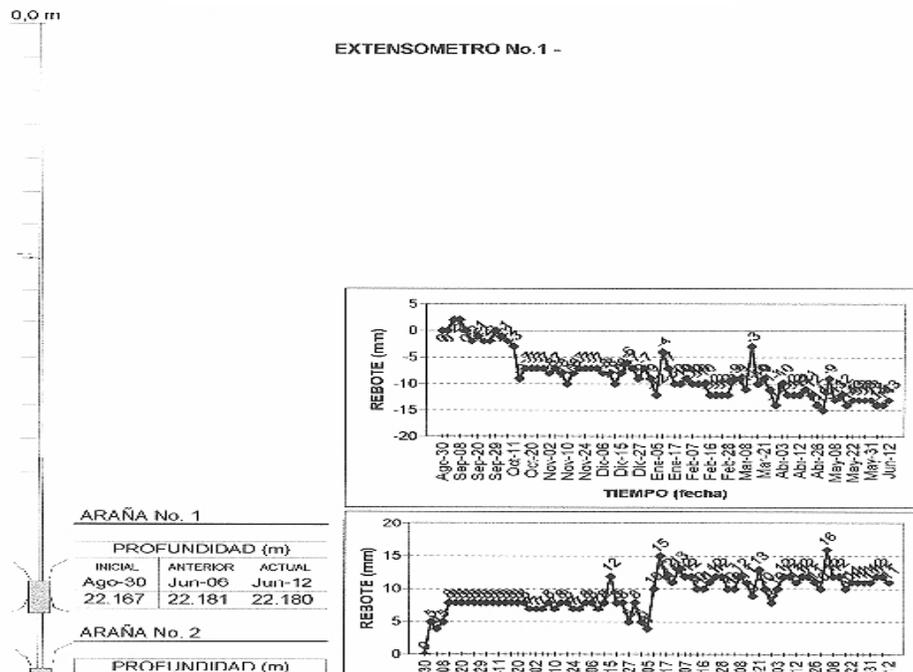


Figura No. 11. Extensómetro de arañas magnéticas. Nótese los rebotes inferiores a 15 mm en la araña profunda mientras que la araña superficial indica asentamientos hasta de 15 mm. Las deformaciones observadas indican un comportamiento en el rango elástico.

- Finalmente y como complemento a la instrumentación geotécnica se instalaron puntos topográficos entre platinas y niveletas para verificar asentamientos por detrás de las pantallas y en algunos puntos internos de la obra.

INDICES CONSTRUCTIVOS

De los valores obtenidos por el contratista de la estructura a continuación se ilustran algunos índices constructivos de interés para futuros proyectos de características similares (los costos no incluyen IVA ni AIU):

INDICES CONSTRUCTIVOS OBTENIDOS

Prof de excavación	Rendimiento excav (m3/dia)	Costo total excav. (pesos/m3)
1er sótano	234.59	7000
2do sótano	169.72	13182
3er sótano	154.09	15832
4to sótano	100.97	16832

Ficha Técnica

Gerencia del proyecto: ESPINOSA FENWARTH & Cia

Interventoría: PAYC

Constructor general: PIZANO PRADILLA & CARO

Contratista de Estructura: H.ROJAS & Cia

Contratista de Pilotaje: Unión temporal GALANTE HERRERA S.A- E&R
PILOTAJES Ltda.

Diseño estructural: P.C.A.

Estudio de suelos e Instrumentación geotécnica: ESPINOSA & RESTREPO Ltda.