



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**LA PARTICIPACIÓN DEL INGENIERO
QUÍMICO EN EL ESTUDIO DE MECÁNICA DE
SUELOS PARA UNA PLANTA INDUSTRIAL**

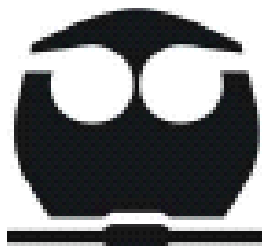
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O Q U Í M I C O

P R E S E N T A :

MARCOS EMMANOEL VALLARTA GIL



MÉXICO, D. F.

SEPTIEMBRE 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE PROF. ISAÍAS ALEJANDRO ANAYA Y DURAND

VOCAL PROF. HUMBERTO RANGEL DÁVALOS

SECRETARIO PROF. JOSÉ ANTONIO ORTÍZ RAMÍREZ

1er. SUPLENTE PROF. AGUSTÍN TEXTA MENA

2do. SUPLENTE PROF. EZEQUIEL MILLÁN VELASCO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

ESTA TÉISIS DE LICENCIATURA SE REALIZÓ EN LA TORRE DE INGENIERÍA

ASESOR DEL TEMA

M. EN I. JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMIREZ

SUSTENTANTE

MARCOS EMMANOEL VALLARTA GIL

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Armando Ramírez Rascón por asesorarme e involucrarme a realizar este trabajo de tesis y por compartirme sus conocimientos laboralmente.

Agradezco las palabras que el M. en C. José Antonio Ortiz Ramírez me dijo “no puedes desechar este trabajo” el me ayudo a rescatar este trabajo de tesis, por su apoyo, por confiar en mí, por motivarme, por su invaluable amistad y su calidad humana.

A los miembros del jurado gracias por sus opiniones y contribuciones para la presente tesis.

A la UNAM por ser mi segundo hogar, por prepararme profesionalmente y laboralmente.

A mi Madre quien fue padre y madre, sacrifico media vida por educarme, por motivarme, por imponerme a ser profesionista, y preocuparse siempre por mi.

A mi abuelita María Gil quien me enseñó que con valores, respeto y perseverancia se alcanza una vida colmada.

A mi tío e ingeniero Orlando (Gil)² por todo su apoyo y su ejemplo de vida.

A mi Amiga, Compañera, Colega, Novia y futura Esposa Ing. Karen Álvarez por su ayuda, apoyo incondicional, por su amor y paciencia que me enseña lo maravilloso de vivir.

A todos mis amigos de la Fac. Angélica, Kitzia, Elena, Macu, Carlos, Rafa, por motivarme.

A mis amigos del CCH Arturo Limón, Pablo Lorenzana, Roberto Martínez, Víctor Yerves, que con más de 10 años me han dado todo su apoyo y amistad y me han enseñado con el ejemplo lo que debo y no debo hacer gracias porque han estado ahí incondicionalmente.

DEDICATORIAS

A Dios quien siempre ha estado presente en mi camino.

Al Ing. José Antonio Ortiz

Por ser mi asesor, compañero y por darme la confianza y seguridad de que este trabajo tiene un valor agregado.

A mi Madre:

Por creer en mi, por apoyarme incondicionalmente a lo largo de mi vida, por impulsarme a terminar una profesión, por darme la confianza, fortaleza y consejos que me llevaron a terminar algunas de mis metas.

A mi hermana:

Que aún estando lejos me apoyo en momentos cruciales.

A mi novia y futura esposa Karen:

Por brindarme conocimientos, apoyo, compañía, paciencia, respeto, amor y por compartir momentos tan gratificantes e invaluable en mi vida.

A mis amigos:

A los del CCH y de la H Facultad de Química, que han estado conmigo en momentos importantes de mi vida como estudiante de esta gran universidad.

	Índice
	<i>Página</i>
Resumen	1
Introducción.....	2
objetivos	6
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE UNA PLANTA CRIOGÉNICA.....	7
1.1 Importancia de las plantas criogénicas en México	7
1.2 Breve historia de un proceso criogénico	7
1.3 Procesos de separación de gases	8
1.4 Fundamentos de un proceso criogénico	8
CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL LUGAR DE INSTALACIÓN DE LA PLANTA	10
2.1 Ubicación	10
2.2 Clima	11
2.3 Hidrología.....	12
2.4 Composición del subsuelo	13
2.5 Sismicidad.....	15
CAPÍTULO III. EXPLORACIÓN, MUESTREO Y PRUEBAS DE LABORATORIO....	17
3.1 Propiedades Mecánicas.....	17
3.2 Métodos geofísicos.....	17
3.2.1 Métodos indirectos	18
3.2.2 Métodos semidirectos	22
3.2.2.1 Prueba de penetración estandar	22
3.2.3 Métodos directos.....	25
3.2.3.1 Sondeos.....	25
3.2.3.2 Pozos a cielo abierto.....	26
3.3 Trabajos de laboratorio.....	31
3.5 Trabajos de Gabinete	35
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS MECÁNICO PARA DISEÑAR LAS CIMENTACIONES ...	38
4.1 Clasificación de suelos	40
4.2 Diseño de pavimentos	42
4.3 Cálculo de la Capacidad de Carga neta última.....	44
4.4 Módulos de Reacción	46
CAPÍTULO V. RECOMENDACIONES DE CIMENTACIÓN	48
5.1 Pilas.....	49
Conclusiones y recomendaciones	51
Referencias	44
Anexo	55
Glosario	70

Índice de Tablas y figuras

Página

Tablas

Tabla I	Parámetros climáticos promedio de Poza Rica	11
Tabla II	Resistividad eléctrica de distintos suelos	20
Tabla III	Estratigrafía General del Terreno	29
Tabla IV	Localización y tipo de muestras	30
Tabla V	Localización y tipo de muestras	34
Tabla VI	Resultados de pruebas triaxiales	36
Tabla VII	Hundimientos bajo losas de piso	37
Tabla VIII	Estratigrafía General del Terreno.....	39
Tabla IX	Espesor de pavimento y resistencia a la tensión del concreto	44
Tabla X	Capacidades de carga	45
Tabla XI	Módulos de reacción	46
Tabla XII	Dimensiones de diseño de la pila	51

Figuras

Figura I	Diagrama de flujo de una planta criogénica	10
Figura II	Localización del área de estudio	11
Figura III	Carta hidrológica de la republica mexicana.....	12
Figura IV	Carta Geológica Regional.....	13
Figura V	Región sísmica de la república mexicana.....	15
Figura VI	Método de Resistividad Eléctrica	19
Figura VII	Esquema del dispositivo para exploración del método sísmico	21
Figura VIII	Penetrómetro estándar	22
Figura IX	Compacidad relativa	24
Figura X	Relación entre la penetración estándar, la presión vertical y la compacidad relativa para arenas	24
Figura XI	Pozo a cielo abierto	27
Figura XII	Carta de plasticidad	41
Figura XIII	capa subrasante y sub-base.....	29
Figura XIV	Pilas se cimentación.....	49

RESUMEN

Para el desarrollo de la Ingeniería de una Planta Química, una de las etapas más importantes corresponde al estudio de la mecánica de suelos, aunque este estudio es integrado por ingenieros civiles y especialistas de otras áreas, el Ingeniero Químico al ser el responsable de la planta química, deberá tener los conocimientos generales suficientes para poder coordinar estas áreas de la ingeniería y aprobar los documentos generados, con el fin de lograr continuar con las etapas subsecuentes del proyecto, teniendo la certeza de que los equipos, el montaje y las instalaciones sean seguras ante cualquier tipo de eventualidad.

En este trabajo se reportan en un punto de vista general de la ingeniería los trabajos de exploración de campo y de laboratorio, los aspectos regionales y locales útiles para comprensión del subsuelo del sitio, los tipos de cimentación recomendadas así como conclusiones y recomendaciones del estudio para una Planta Criogénica de 200 MMPCD

INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo la ingeniería general del proyecto en forma real y proporcionar a los ingenieros químicos la experiencia y la multiplicidad de aspectos asociado a la ingeniería civil, el ingeniero químico deberá conocer lo más detalladamente posible la selección del sitio, donde deberá localizarse la planta química.

Sin ser exhaustivos algunos de los aspectos más importantes a considerar en la selección del sitio son:

- a) La asignación del área debe ser considerada para desarrollo de industria pesada.
- b) La existencia de plantas químicas similares y la localización de otros centros industriales.
- c) La disponibilidad de carreteras o caminos de acceso y servicios como: electricidad, aguas gas etc. Si hay un adecuado acceso para la transportación de materias primas substancias químicas y para la construcción de la planta.
- d) Que el terreno sea apropiado así como la superficie y el drenado.
- e) Acceso adecuado para transportar materias primas, substancias químicas y la construcción de la planta.
- f) Proximidad de caminos de acceso, autopista, puertos, aeropuertos, etc.
- g) Disponibilidad de personal calificado y cercanía a las comunidades.
- h) Normas, reglamentos y estándares ambientales.
- i) Proximidad con los proveedores de materias primas o con los compradores del producto final
- j) Existencia de centros de atención médica.
- k) Condiciones climatológicas.
- l) Restricciones gubernamentales.

- m) Espacio para expansión futura.
- n) Precio del terreno.
- o) Opinión pública.
- p) Área sísmica.
- q) Incentivos y estímulos gubernamentales.

Como se podrá observar uno de los factores importantes se refiere al terreno apropiado para la construcción, lo cual únicamente se puede conocer mediante un estudio de mecánica de suelos.

El ingeniero químico no es un especialista que lleva a cabo este tipo de estudios sin embargo, si puede llevar a cabo la función de coordinador general del proyecto puede adoptar dos posiciones:

La primera implica en confiar ciegamente en los resultados obtenidos por el especialista

La segunda en la que con un criterio adecuado y un conocimiento general de los aspectos más relevantes del estudio pueda avalar los resultados o en su caso solicitar que se revisen aquellos puntos cuestionables.

Para poder revisar y aprobar dichos documentos asociados a la mecánica de suelos es importante que por lo menos una vez en su vida profesional se involucre en el cálculo detallado para que en futuros trabajos pueda comunicarse adecuadamente con los especialistas y fungir como coordinador general del proyecto.

Lo mencionado en los párrafos anteriores nos lleva a presentar en este trabajo cada una de las etapas que integran un estudio de mecánica de suelos, los equipos para las pruebas, resultados de laboratorio y los cálculos asociados se ilustran con un ejemplo real.

Cada año hay incrementos en la demanda de combustibles y debido al aumento en la oferta de Producción de gas asociado proveniente del Proyecto de Aceite Terciario del Golfo en la Región Norte (Sectores 4, 6 y 7 del Paleocanal de Chicontepec), Pemex-Gas y Petroquímica Básica (PGPB) requiere ampliar su capacidad de proceso de Gas Húmedo Dulce en la región de Poza Rica, Ver., para lo cual es necesario instalar en una primera etapa una Planta Criogénica Modular de 200 MMPCD de capacidad nominal con Área de Fraccionamiento integrado de 12 MBD y sus Servicios Auxiliares. Continuando en una segunda etapa futura la instalación de dos plantas más de las mismas características para alcanzar una capacidad total de procesamiento de 600 MMPCD.

Para el desarrollo de la Ingeniería de una planta Química, una de las etapas más importantes corresponde al estudio de la mecánica de suelos del lugar donde se instalará, aunque este estudio es llevado a cabo ingenieros civiles y especialistas de otras áreas, el Ingeniero Químico al ser responsable del proyecto de la planta química, deberá tener los conocimientos generales suficientes para poder coordinar estas áreas de la ingeniería y aprobar los documentos generados, con el fin de lograr continuar con las etapas subsecuentes del proyecto, teniendo la certeza de que los equipos, el montaje y las instalaciones sean seguras ante cualquier tipo de eventualidad.

En este trabajo se reportan en un punto de vista general de la ingeniería los trabajos de exploración de campo y de laboratorio, los aspectos geológicos regionales y locales útiles para comprensión de los materiales del subsuelo del sitio, los tipos de cimentación recomendadas, los métodos de análisis mecánico de las cimentaciones recomendadas, así como las observaciones adicionales que convengan. Finalmente, en los *Anexos* se presentan, un diagrama de Proceso de una Planta Industrial, así como sondeos mixtos y pozos a cielo abierto (PCA), los perfiles estratigráficos y geotécnicos de cada sitio explorado, los resultados de laboratorio, las ecuaciones utilizadas para los cálculos de capacidad de carga y trabajos de campo.

Mediante la exploración se deben obtener resultados confiables con un mínimo de costo y tiempo. La confiabilidad del estudio geotécnico depende de los trabajos de exploración, por lo tanto, éstos deben realizarse en forma cuidadosa, siguiendo métodos y normas establecidas. Por lo anterior, es necesario que especialistas en mecánica de suelos elaboren el programa de exploración apropiado definiendo tipo, número y profundidad de los sondeos.

En zonas de suelos blandos y/o alto riesgo sísmico es importante diseñar considerando el comportamiento dinámico de las estructuras que sobre ellos se alojen y en especial las catalogadas como tipo "A", las cuales por lo general presentan varios niveles, transmiten fuertes cargas al terreno y son de suma importancia en caso de emergencias, Es por ello que los espectros de respuesta del subsuelo en el que se cimentarán esos inmuebles cobran cada vez más fuerza en los reglamentos de construcciones para garantizar la integridad de las obras y la seguridad de sus ocupantes.

Con la información obtenida en los trabajos de campo y laboratorio se elaboraron los perfiles de los sondeos correspondientes y se realizará el análisis correspondiente para proponer la cimentación más adecuada para las estructuras en proyecto, abarcando la revisión de los estados límites de falla y de servicio, reportando gráficas de capacidad de carga admisible para diferentes geometrías y niveles de desplante de cimientos, así como su pronóstico de asentamientos a lo largo del tiempo.

OBJETIVOS

I. Presentar los aspectos relevantes que un Ingeniero Químico, en su función de coordinador de un proyecto para una planta química, debe conocer en forma general; entre estos aspectos se contempla:

- Las características geológicas
- Los métodos de exploración y muestreo
- El análisis mecánico de las cimentaciones
- Las recomendaciones de cimentación

2. Realizar dichos aspectos, aplicados a una planta criogénica con el fin de proporcionar información de las condiciones actuales del subsuelo en el sitio del proyecto, y de dar recomendaciones para el diseño de cimentaciones y estructuras enterradas que se pretendan construir.

CAPITULO I

1. FUNDAMENTOS DE UNA PLANTA CRIOGÉNICA

1.1 Importancia de las plantas Criogénicas en México

El gas natural representa para México uno de los recursos naturales no renovables de mayor importancia, tanto por su potencial energético como por construir una de las principales fuentes de materias primas para la industria de la petroquímica básica. Dicho aprovechamiento implica la instalación y operación de plantas de tratamiento y licuefacción del gas natural en condiciones criogénicas. Su uso en la industria de los hidrocarburos se ha incrementado en los últimos tiempos con especial interés en el gas natural, ya que los procesos criogénicos han permitido que el gas natural pueda ser licuefactado y, por ende, transportado mediante buques especialmente acondicionados a destinos muy lejanos.

1.2 Breve Historia del Proceso Criogénico

La palabra criogénica significa literalmente producción de frío, pero éste término es usado como sinónimo de bajas temperaturas. La criogénica o denominada también el congelamiento ultra frío, es una técnica utilizada para enfriar materiales generalmente en estado gaseoso a temperaturas muy bajas como la temperatura de ebullición del nitrógeno ($-195.79\text{ }^{\circ}\text{C}$) e incluso más bajas. Para lograr estas temperaturas se usan diversos productos siendo los más conocidos el nitrógeno y el helio.

La tecnología para licuar gases empezó a desarrollarse en la segunda mitad del XIX. En 1877 Caillet en Francia produjo una niebla de gotas de aire líquido, expandiendo aire previamente enfriado. Por la misma época Pictet en Génova también obtuvo un pequeño chorro de oxígeno y Nitrógenos líquidos. En 1892

Dewar desarrolló los recipientes enchaquetados a vacío par almacenamiento de fluidos criogénicos y en 1895 obtuvo hidrógeno líquido.

En 1902 George Claude desarrolló un sistema práctico para la licuefacción de aire, en el cual la mayor parte del efecto de enfriamiento se obtuvo usando una máquina de expansión recíproca. Por último en 1934 Kapitza, premio Nobel en física en 1978 desarrolla en la desaparecida URSS un método para licuar helio usando una máquina de expansión rotativa.

1.3 Proceso de Separación de Gases

El gas natural o gas asociado con el petróleo de los yacimientos, es en realidad una mezcla de gases tales como el metano, etano, propano, hasta hexanos más pesados. Cada componente o grupo de componentes poseen características especiales que determinan su aplicación en la industria actual.

Existen algunos procesos para la separación de estos componentes o grupos de componentes tales como el de absorción y el criogénico, El proceso criogénico es también el de mayor aplicación en la separación de componentes del aire.

1.4 Fundamentos de Proceso criogénico

Proceso para separar gases aplicando métodos de temperaturas reducidas (menores a -200°F) comprende dos etapas principales: la licuefacción y la destilación o rectificación del líquido. Los procesos criogénicos para la separación de gases son esencialmente fenómenos físicos tales como: intercambio de calor, expansión, separación simple de fases y destilación, etc.

El proceso criogénico consiste básicamente en alcanzar altos niveles de enfriamiento por medio de sistemas de refrigeración auxiliar y expansiones

sucesivas para llevar el gas natural a la fase líquido-gas y separar los componentes o grupos de componentes por destilación.

En el procesamiento de hidrocarburos, una planta criogénica puede ser usada para:

1. Separar el gas natural de sus líquidos (licuefactado: es aquel gas que ha sido reducido en volumen hasta en 600 veces su tamaño original y convertida a líquido.
2. Para licuefactar el gas natural con la finalidad de hacer viable su transporte a puntos lejanos.

El enfriamiento puede ser conseguido por cualquiera de los siguientes fenómenos físicos o una combinación de ellos.

- 1.- Enfriamiento a presión constante (enfriadores).
- 2.- Enfriamiento por expansión en una máquina en al cual se produce trabajo (expansores).
- 3.- Enfriamiento por válvula de expansión o estrangulación.

CAPITULO II

2. CARÁCTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL LUGAR DE INSTALACIÓN DE LA PLANTA

2.1 Ubicación

Es importante recabar toda la información necesaria para conocer las características del lugar de instalación de la planta industrial.

El lugar donde se construirá esta planta se encuentra ubicado en la zona centro del Estado de Veracruz en las coordenadas 20° 32" latitud norte y 97° 27" longitud oeste, a una altura 50 metros sobre el nivel del mar. Limita al noroeste y este con Papantla al sur con Coatzintla; al noroeste con Tihuatlán. Su distancia aproximada al noroeste de la capital del Estado por carretera es de 290 Km.

La ciudad y municipio de Poza Rica de Hidalgo es una de las ciudades más jóvenes del país se encuentra ubicada al norte del estado mexicano de Veracruz, en la región del Totonacapan, al oriente de la república mexicana.

Poza Rica es la cuarta ciudad en importancia económica del estado de Veracruz y el principal núcleo urbano de la zona norte del estado y parte de la sierra del estado de Puebla. Su zona conurbana está conformada por asentamientos y núcleos de población, fraccionamientos, colonias, áreas industriales y comerciales, asentadas sobre territorios de los municipios limítrofes en una conurbación en proceso de ratificación por parte de los ayuntamientos involucrados y el congreso del estado, misma que incluiría a 5 municipios en forma parcial, en donde la ciudad de Poza Rica constituiría el núcleo central, con algunos sectores periféricos dentro de los municipios de Coatzintla, Tihuatlán, Cazonas y Papantla.

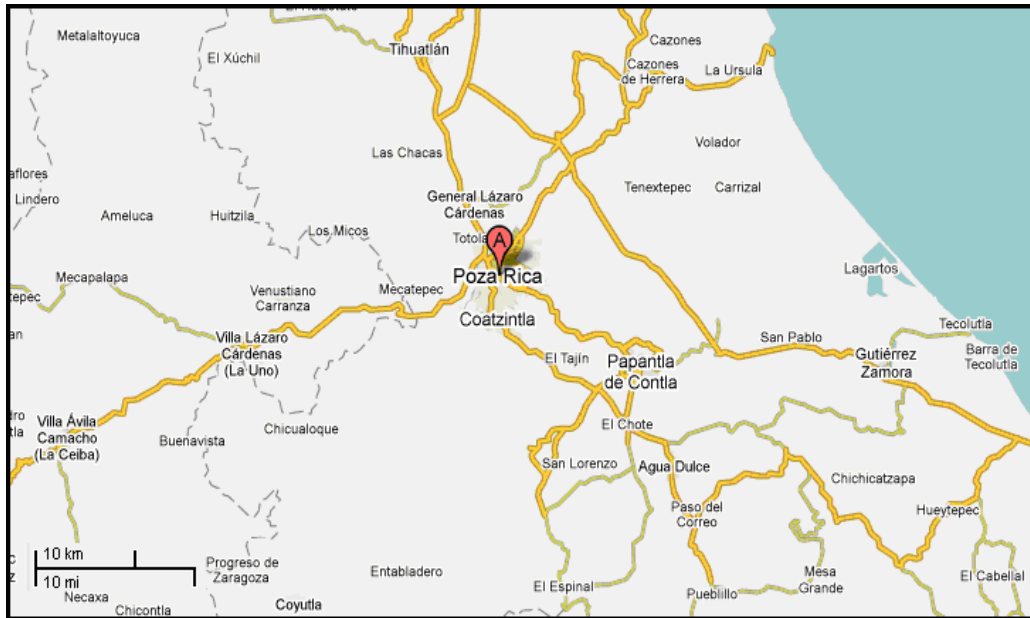


Figura II Localización del área de estudio (fuente Google maps)

2.2 Clima

El clima de la región es cálido, con una temperatura media anual de 24.4 °C, con abundantes lluvias en verano y principios de otoño. La precipitación media anual es de 1,103 mm.

Parámetros climáticos promedio de Poza Rica													
Mes (2009)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima registrada (°C)	36	38.5	42.5	47	45.5	43.5	40	41	40	38.5	38	36	47
Temperatura diaria máxima (°C)	24.7	26.5	30	32.5	35.4	35.2	34.3	34.5	33.4	31.3	28.2	25.2	30.9
Temperatura diaria mínima (°C)	14.5	15.2	18	20.2	23	23.3	22.7	22.5	22.1	20.1	17.7	15.4	19.6
Temperatura mínima registrada (°C)	4	4.5	7	9	16	17	19	15	12	11	6	-0.5	-0.5
Precipitación total (mm)	41.6	35.8	36.5	59.1	87.6	157.7	131.6	138.8	226.8	138.6	79.1	53.6	1186.8

Tabla 1 (fuente servicio meteorológico nacional 10.01.09)

2.3 Hidrología

El municipio de Poza Rica está enclavado en la cuenca hidrográfica del río Cazonés este río de 100 km de longitud nace en la región montañosa del estado de Hidalgo y desemboca en el Golfo de México, tiene un escurrimiento promedio anual superior de 40 m³/s en su desembocadura. La ciudad también se encuentra circundada por varios arroyos tributarios del río Cazonés como son el Mollejón Hueleque, Salsipuedes y Arroyo del Maíz, que regularmente se ven afectados por inundaciones en la temporada anual de lluvias.

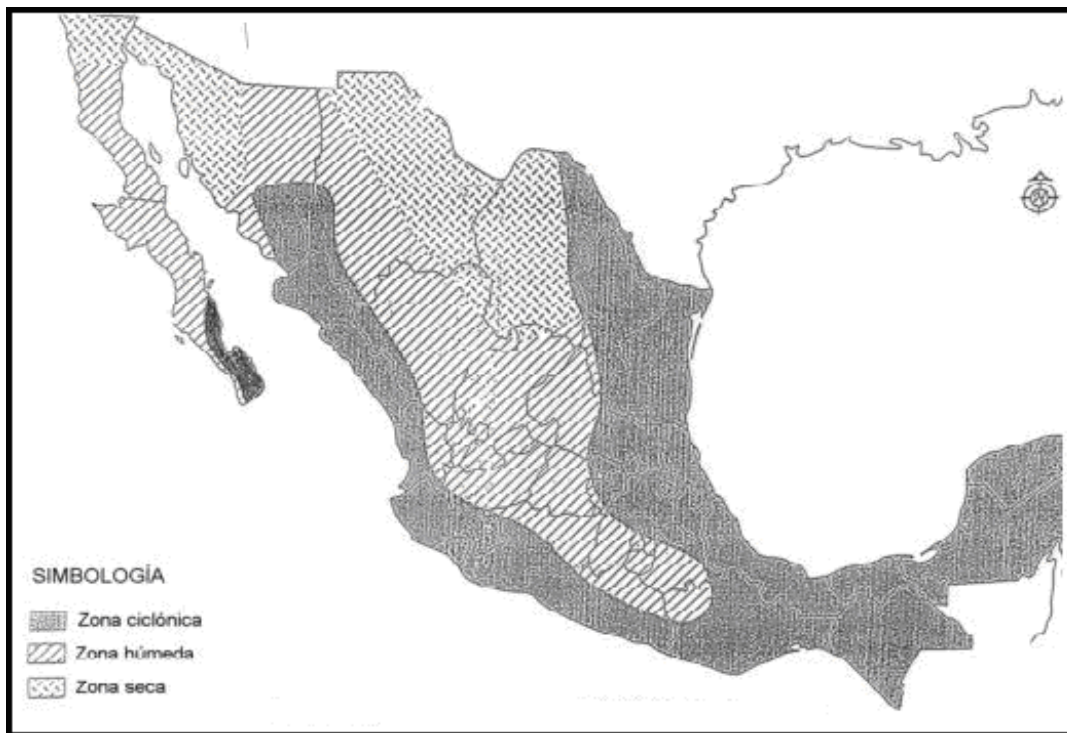


Figura III Carta hidrológica de la republica mexicana

2.4 Composición del subsuelo

Su suelo es de tipo vertisol (Suelos ricos en arcilla; generalmente en zonas subhúmedas a áridas, con hidratación y expansión en húmedo y agrietados cuando secos.)

que representa grietas anchas y profundas en época de sequía.

Como lo muestra la carta geológica regional que se presenta en la figura 3.4 el caudaloso Río Cazones y sus afluentes inciden formaciones sedimentarias mesozoicas y cenozoicas y formaciones volcánicas cuaternarias, de muy diversas composiciones litológicas, las que aflorando en el escarpado descenso del *Altiplano Mexicano*, son notablemente erosionadas por las corrientes que se abastecen de una importante cantidad de detritos de tamaños relativamente grandes, siendo los más pesados depositados en las partes altas de la *Planicie Costera del Golfo*, donde, al suavizarse la pendiente, ocurre una reducción de la velocidad de la corriente y por tanto de su capacidad de transporte.

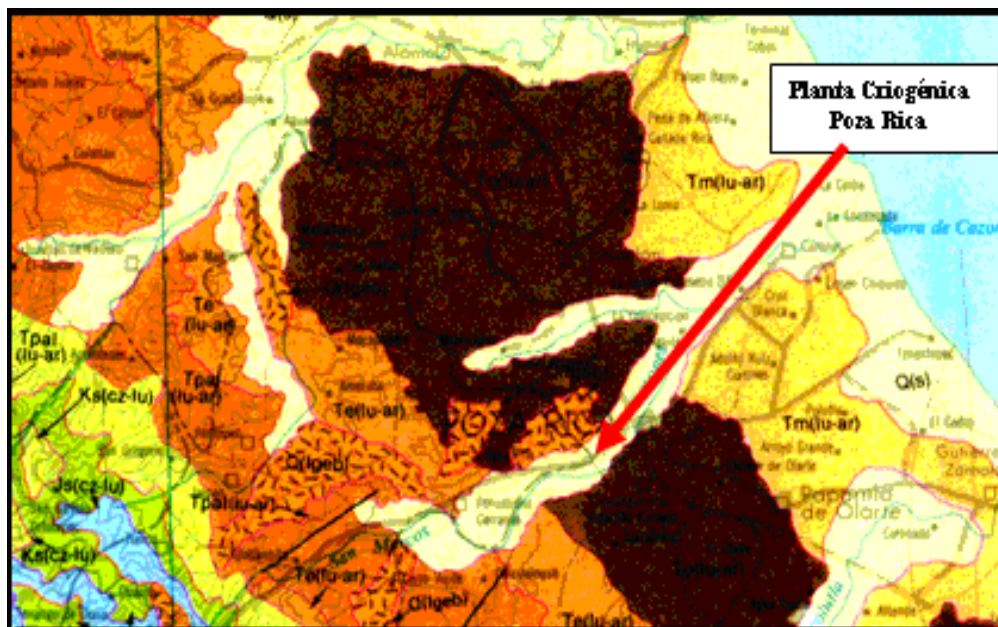


Figura IV Carta Geológica Regional

En consecuencia, al estar Poza Rica relativamente cerca del pié del *Altiplano*, el subsuelo del terreno en que se construirá la Planta Criogénica, está formado por depósitos aluviales recientes, con espesor promedio de 6.7m, subyacidos por lutita del oligoceno, la que aunque como roca puede considerarse blanda, es un suelo de consistencia muy dura.

En esta materia se identifican dos tipos de trabajos: Geofísicos, que consistirán en la determinación del perfil de velocidades de onda en el predio mediante la técnica “sonda suspendida” (down-hole); y de Mecánica de Suelos, que se desarrollarán para conocer la secuencia estratigráfica presente en el subsuelo, cuantificar las propiedades mecánicas de los materiales del subsuelo, recomendar las características de los cimientos que se pretendan construir y preparar un pronóstico de comportamiento durante su vida útil, así como la determinación de la estructura actual de los pavimentos existentes obteniendo su grado de compactación, su peso volumétrico seco máximo y su contenido de humedad óptimo; así como las recomendaciones para el diseño de los pavimentos a partir de las condiciones del sitio y un vehículo de diseño T3-S2, considerando la recomendación para el diseño y construcción de juntas para ligar los pavimentos nuevos con los existentes.

Adicionalmente, se estudiaron al menos dos bancos de materiales que se localicen en la cercanía del predio para su análisis en su potencial ocupación como rellenos y capas de pavimentos, mencionando las distancias a las que se encuentran dichos bancos con respecto al sitio del proyecto.

Perfil de velocidades de onda registradas e interpretadas a lo largo de un sondeo ejecutado para tal fin. Preparación de un perfil de velocidades de onda de corte mediante la técnica “sonda suspendida” al centro del predio, hasta una profundidad del orden de 70 m, de acuerdo a la secuencia estratigráfica que se detecte para determinar las condiciones de sitio desde el punto de vista de la

respuesta sísmica y de dinámica de suelos, según el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad en su edición de 1993 (MOC-CFE-93).

Los resultados de la composición del suelo cada una de las capas en que se presentan, llámense estratos, complementarán las mediciones geotécnicas y servirán para establecer los módulos dinámicos de los diferentes paquetes presentes en el subsuelo.

2.5 Sismicidad

Conforme a la *Regionalización Sísmica de la República Mexicana (Diseño por Sismo, Manual de Diseño de Obras Civiles, CFE, IIE, 1993)*, Poza Rica se encuentra en la zona B y las estructuras que contempla es proyecto son de los Grupos A y B.

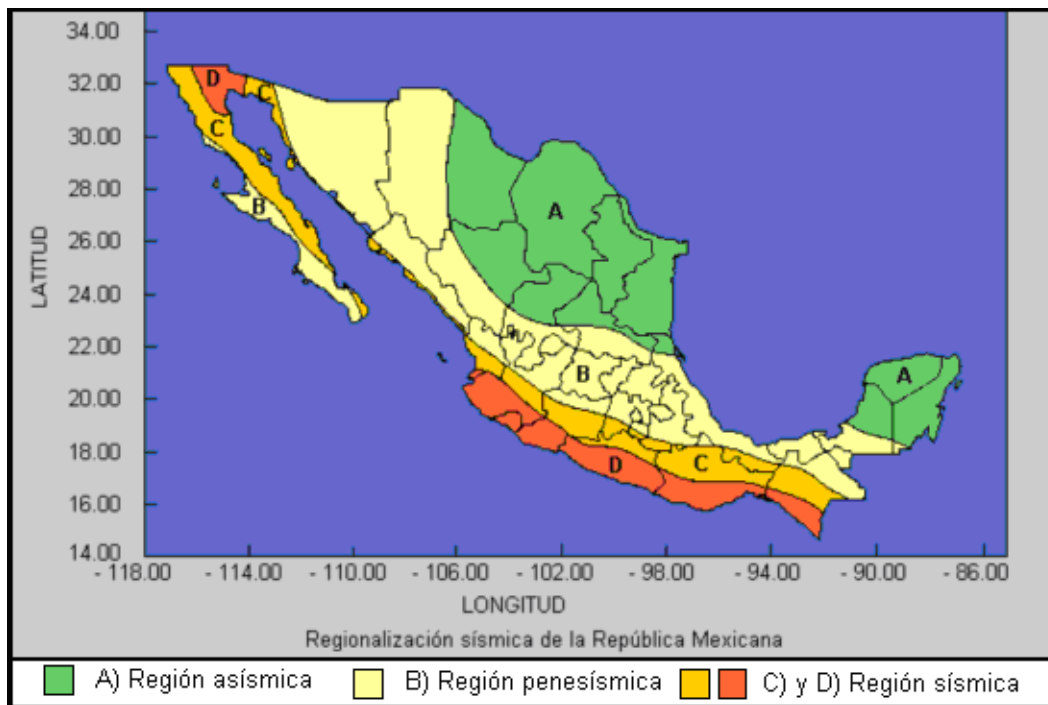


Figura V Región sísmica de la república mexicana (servicio sismológico UNAM)

La propiedad física fundamental en que se basa la prospección geofísica por métodos sísmicos, es la variación de la velocidad de transmisión de las ondas en diferentes formaciones geológicas. Cuando se induce artificialmente una oscilación en un punto del suelo el movimiento inicial se transmite al medio circundante en forma de vibraciones llamadas sísmicas.

Proceso: Colocados en línea en el terreno cierto número de receptores llamados geófonos, separados entre sí una longitud medida. En el punto de explosión se vuela una carga de un explosivo o con un martillo equipado se golpea el terreno. Las ondas sísmicas producidas por la explosión al terreno llegan a los geófonos, que la recogen, amplifican y transmiten al aparato registrador u oscilógrafo de esta forma, se obtiene el registro sísmico o sismógrafo.

CAPITULO III

3. EXPLORACIÓN, MUESTREO Y PRUEBAS DE LABORATORIO

3.1 Propiedades Mecánicas

El estudio de Mecánica de Suelos nos interesa para analizar el comportamiento del terreno para ser usado como material de construcción o como base de sustentación de las obras de ingeniería.

La importancia de los estudios de la mecánica de suelos radica en el hecho de que si se sobrepasan los límites de la capacidad resistente del suelo o si, aún sin llegar a ellos, las deformaciones son considerables, se pueden producir esfuerzos secundarios en los miembros estructurales, quizás no tomados en consideración en el diseño, produciendo a su vez deformaciones importantes, fisuras, grietas, alabeo o desplomos que pueden producir, en casos extremos, el colapso de la obra o su inutilización y abandono.

3.2 Métodos Geofísicos

Los métodos geofísicos son pruebas realizadas para la determinación de las características geotécnicas en la superficie de un terreno. En geotécnia los métodos de exploración se dividen en indirectos, semidirectos y directos.

Los métodos geofísicos, son los más aplicables para este estudio. Además se describirán los métodos de exploración geotécnica más usados en nuestro país, así como el tipo de muestreo que se puede obtener de cada método y el tipo de pruebas de laboratorio que se les pueden practicar para definir las propiedades físicas y mecánicas que intervienen en el análisis y diseño de una cimentación.

Estos métodos se utilizan para obtener información preliminar del subsuelo, para complementar la información geológica, hacer una deducción de las posibles

características estratigráficas, posición del nivel freático, posibles tipos y propiedades de suelos o rocas, presencia de fallas, fracturas y cavernas. Los métodos son rápidos, permitiendo tratar grandes áreas, pero nunca proporcionan suficiente información para fundar criterios definitivos de proyecto. En el caso de estudios para fines de cimentación no se puede considerar que los métodos geofísicos sean adecuados, pues no rinden una información de detalle comparable con la que puede obtenerse de un programa de exploración convencional.

3.2.1 Métodos indirectos

Con estos métodos de exploración se realizan mediciones indirectamente de propiedades físicas de los suelos y rocas. Los principales métodos indirectos para este caso son:

- a) Método de resistividad eléctrica
- b) Método sísmico

a) Resistividad eléctrica

El método de resistividad eléctrica se basa en medir desde la superficie del terreno los cambios de resistividad de los diferentes estratos o unidades geológicas del subsuelo. Este método se basa en la interpretación del campo eléctrico creado por la circulación de una corriente eléctrica en el subsuelo (natural o artificial); estableciendo una relación entre los parámetros físicos que intervienen en la propagación de la corriente y las características físicas de los materiales empleando para ello aparatos receptores y transmisores. Se pueden utilizar para la localización de minerales y estructuras geológicas. Para determinar la resistividad del terreno, se mide en el amperímetro la corriente que fluye de la batería y se corre por el terreno entre los electrodos de corriente. Al mismo tiempo se mide con el voltímetro la diferencia de potencial entre los electrodos de potencia.

El método de resistividad se puede utilizar para medir:

- I) la resistividad para distintas profundidades en un punto dado
- II) la resistividad en distintos puntos a lo largo de un perfil, para una profundidad dada.

En el método I, la distancia a entre los electrodos se va aumentando progresivamente para determinar los cambios de resistividad con la profundidad. Al aumentar la distancia a entre los electrodos, la corriente penetra a una mayor profundidad.

En el método II, los cuatro electrodos se mantienen a distancia constante moviéndolos en conjunto a lo largo de una línea recta y realizándose las medidas de resistividad en diferentes estaciones. En contraste con los cambios verticales de resistividad obtenidos con el método 1, en éste se indican los cambios laterales. Las medidas de campo se indican gráficamente como perfiles de resistividad.



Figura VI Método de Resistividad Eléctrica

La precisión de este método para predecir la estratigrafía de un sitio es generalmente menor que la del método sísmico (refracción sísmica), sin embargo es más confiable para determinar la posición del nivel freático y detectar estratos blandos.

Tabla II Resistividad eléctrica de distintos suelos

Material	Resistividad (ohms-m)
Suelos finos	1 a 10×10^4
Arenas	2.2 a 4×10^2
Depósito glacial	5×10^2
Rocas sedimentarias o no consolidadas	10 a 10×10^6
Rocas ígneas o metamórficas	1000 a 10×10^4

Tabla de valores típicos de resistividades para los distintos tipos de suelos y rocas para la clasificación tentativa de los materiales por medio del método de resistividad eléctrica.

b) Métodos Sísmico.

Este procedimiento se funda en la diferente velocidad de propagación de las ondas vibratorias de tipo sísmico a través de diferentes medios materiales. Las mediciones realizadas sobre diversos medios permiten establecer que esa velocidad de propagación varía entre 150 y 2,500 m/seg en suelos, correspondiendo los valores mayores a mantos de grava muy compactos y las menores a arenas sueltas; los suelos arcillosos tienen valores medios, mayores para las arcillas duras y menores para las suaves. En roca sana los valores fluctúan entre 2,000 y 8,000 m/seg. Como término de comparación se menciona el hecho de que en el agua la velocidad de propagación de este tipo de onda es del orden de 1,400 m/seg. Esencialmente el método consiste en provocar una explosión en un punto determinado del área a explorar usando una pequeña carga de explosivo usualmente nitroamonio. Por la zona a explorar se sitúan

registradores de ondas (geófonos), separados entre sí de 15 a 30 m. La función de los geófonos es captar la vibración, que se transmite amplificada a un oscilógrafo central que marca varias líneas, una para cada geófono. Suponiendo una masa de suelo homogénea que yaza sobre la roca basal, unas ondas llegan a los geófonos viajando a través del suelo a una velocidad u_1 otras ondas llegan después de cruzar oblicuamente dicho suelo. Hay un ángulo crítico de incidencia respecto a la frontera con la roca basal que hace que las ondas ni se reflejen ni se refracten hacia adentro de la roca, sino que las hace viajar paralelamente a dicha frontera, dentro de la roca, con una velocidad u_2 hasta ser recogidas por los geófonos, después de sufrir nuevas refracciones, para transmitirlos al oscilógrafo. El tiempo de recorrido de una onda refractada está determinado por su ángulo crítico, que depende de la naturaleza del suelo y de la roca. Un esquema del dispositivo aparece en la Fig. 7

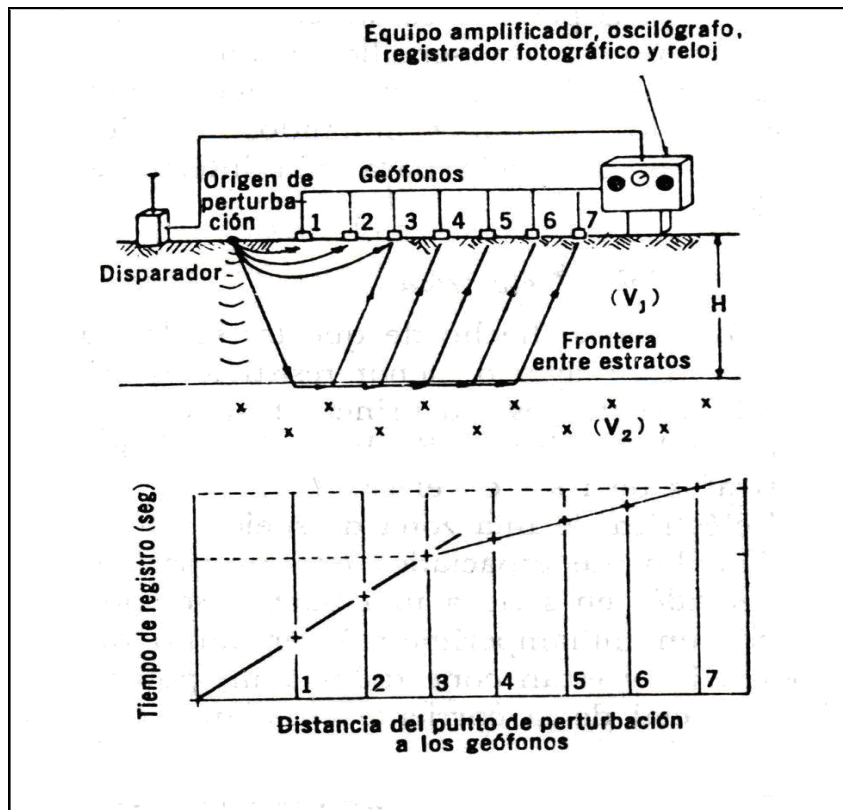


Figura VII Esquema del dispositivo para exploración del método sísmico

La propiedad física fundamental en que se basa la prospección geofísica por métodos sísmicos, es la variación de la velocidad de transmisión de las ondas en diferentes formaciones geológicas. Cuando se induce artificialmente una oscilación en un punto del suelo el movimiento inicial se transmite al medio circundante en forma de vibraciones llamadas sísmicas.

3.2.2 Métodos semidirectos

Consisten en realizar pruebas en el campo para estimar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, a partir de correlaciones empíricas. En estos métodos de exploración se pueden recuperar muestras representativas alteradas, los métodos empelados son prueba de penetración estándar y el método del cono eléctrico

3.2.2.1 Prueba de Penetración Estándar

La prueba de penetración estándar es el tipo de exploración más utilizado en México. Esta consiste en hincar dentro del terreno un muestreador como se puede ver en la figura 8, por medio de golpes que le proporciona un martinete de 63.5 kg de peso que cae desde una altura de 76 cm.

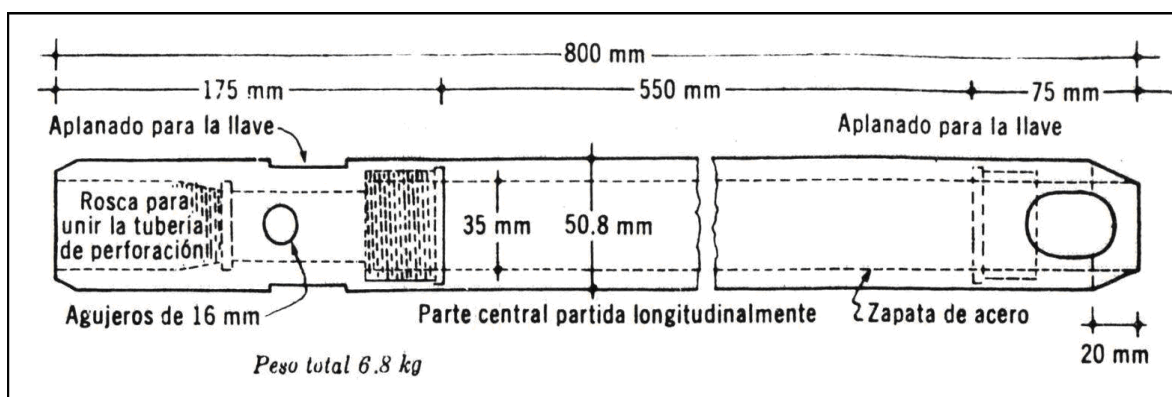


Figura VIII Penetrómetro estándar.

La prueba se realiza a cada 60 cm y la resistencia del terreno se interpreta mediante el número de golpes necesarios para avanzar 30 cm intermedios. Las muestras obtenidas son del tipo alterado y nos permite conocer sus propiedades índice. Con este método pueden llegar a explorarse profundidades hasta de 100m. Los sondeos profundos se llevaron a una profundidad tal que sea un suelo resistente, definido como aquel que presente una resistencia a la penetración estándar superior a los 50 golpes en al menos 5 m continuos de avance o que se considere que los efectos de las cargas sobre la cimentación sean mínimos.

En este tipo de práctica hay ocasiones en que se requiere estabilizar las paredes de la perforación para lo cual se puede utilizar ademe o lodo bentonítico. En suelos friccionantes la prueba permite conocer la compacidad del manto y su ángulo de fricción interna (ϕ) que es la característica fundamental de su comportamiento mecánico; la prueba muestra también que a un número de golpes corresponden diferentes compacidades relativas, según la presión vertical que actúa sobre la arena. La figura 9 muestra la correlación entre el número de golpes para 30cm de penetración estándar y el ángulo de fricción interna de la arena, en tanto la figura 10 presenta gráficamente la relación entre la penetración estándar, la presión vertical y la compacidad relativa para arenas.

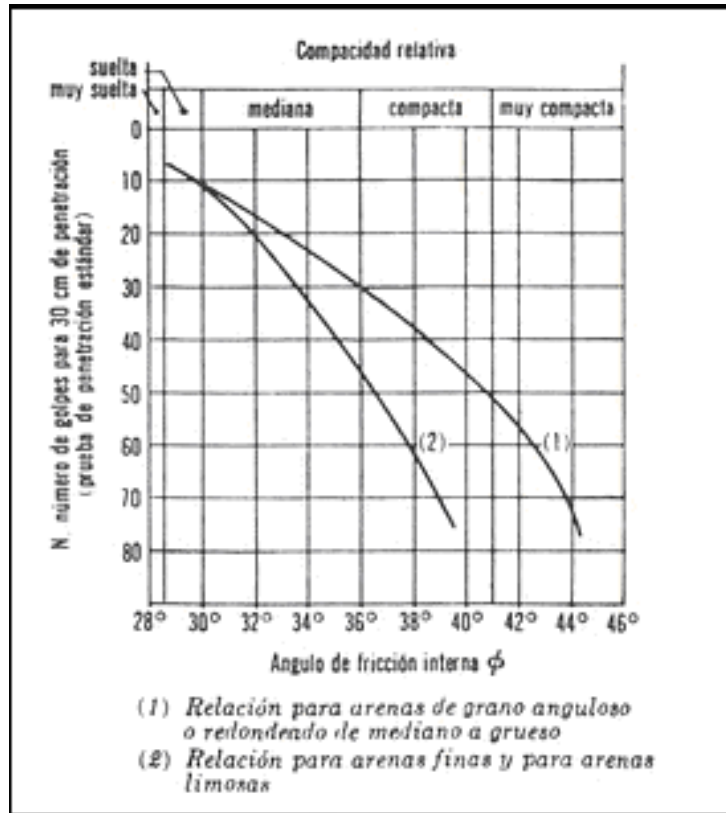


Figura IX Compacidad relativa

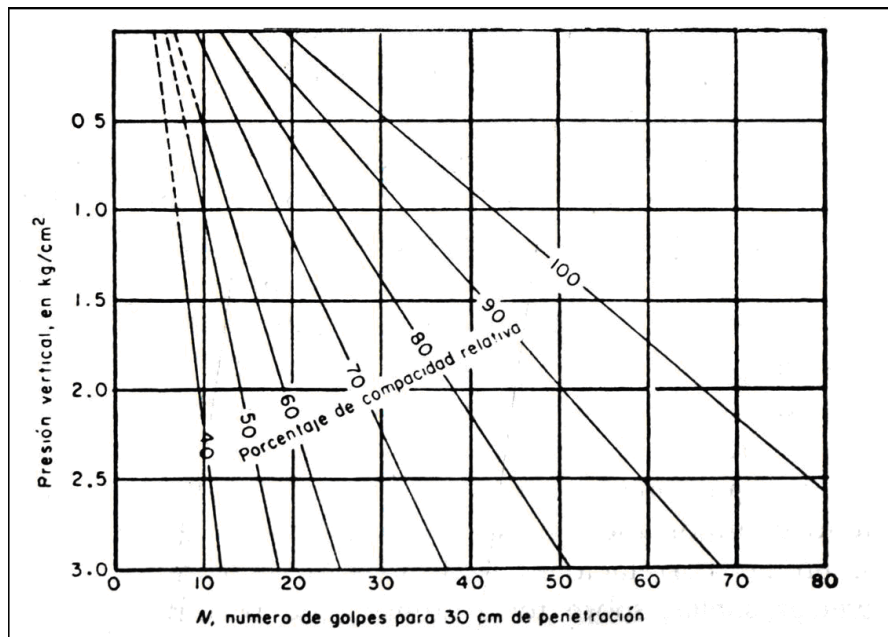


Figura X Relación entre la penetración estándar, la presión vertical y la compacidad relativa para arenas

3.2.3 Métodos directos

En estos métodos de exploración se obtienen muestras que sirven para conocer las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo. Las muestras representativas obtenidas pueden ser, alteradas ó inalteradas que son necesarias en los caso de tipos de obras de infraestructura donde se requiere obtener parámetros mecánicos mediante pruebas especiales de laboratorio (triaxiales, consolidaciones, etc.) y de pruebas índice, pruebas comunes de laboratorio, los métodos usados son la excavación de pozos a cielo abierto y sondeos con equipo de exploración (SPT).

Conforme a la exploración de este método se deben obtener resultados confiables con un mínimo de costo y tiempo. La confiabilidad del estudio geotécnico depende de los trabajos de exploración por lo tanto, éstos deben realizarse en forma cuidadosa, siguiendo métodos y normas establecidas. Por lo anterior, es necesario que especialistas en mecánica de suelos elaboren el programa de exploración apropiado, definiendo tipo, número y profundidad de los sondeos, tomando como base la información recopilada.

3.2.3.1 Sondeos

El objetivo de la investigaciones exploratorias es el de poder determinar información precisa de las características del suelo y de la roca en el lugar en que se investiga como pueden ser, la profundidad, espesor, extensión y composición de cada uno de los estratos; la profundidad de la roca; la profundidad del agua subterránea.

Se define como un sondeo a la perforación realizada para la obtención de muestras del suelo a diversas profundidades y en los sitios de interés para después realizarles los ensayos de laboratorio correspondientes.

En la práctica los sondeos se llevan a cabo mediante diferentes técnicas de perforación cuya selección depende del tipo de suelo a conocer del tipo de muestreo obtenido, del diámetro de la perforación empleado, de la profundidad de exploración y de la localización del sitio.

El número, tipo y profundidad de los sondeos que deban ejecutarse en un programa de exploración de suelos depende fundamentalmente del tipo del subsuelo y de la importancia de la obra. En ocasiones, se cuenta con estudios anteriores cercanos al lugar que permiten tener una idea siquiera aproximada de las condiciones del subsuelo y este conocimiento permite fijar el programa de exploración con mayor seguridad y eficacia.

Se obtuvieron muestras inalteradas mediante tubo Shelby, estas muestras fueron llevadas al laboratorio en bolsas de plástico, etiquetadas hasta el momento en que fueron analizadas. También se extrajeron muestras alteradas de los distintos estratos mediante herramientas manuales, las muestras fueron secadas al horno, disgregadas y almacenadas en un lugar seco, para posteriormente llevar a cabo las distintas pruebas. Generalmente es suficiente detener la exploración al llegar a la roca basal, si ésta aparece en la profundidad estudiada.

3.2.3.2 Pozos a cielo abierto (PCA)

Considerado como el mejor método de exploración, en los pozos a cielo abierto se pueden observar directamente las características del suelo a las diferentes profundidades.



Figura XI Pozo a cielo abierto (PCA)

Los pozos a cielo abierto por lo general en planta son rectangulares (de 1.20 X 1.50 m) y su profundidad puede llegar hasta 5.0 m como máximo, su profundidad se limita sobretodo por la presencia del nivel freático al tipo de materiales y a la estabilidad de sus paredes. Comúnmente se excavan con herramienta manual a base de pico y pala en suelos poco resistentes y con cuña y marro en suelos resistentes, pero también se puede emplear maquinaria.

En este tipo de muestreo, de los pozos a cielo abierto se pueden tomar muestras alteradas e inalteradas de los diferentes estratos que se hayan encontrado. Las muestras alteradas son simplemente porciones de suelos que se protegerán contra pérdidas de humedad introduciéndoles en frascos o bolsas con sus respectivas identificaciones.

El labrado de las muestras inalteradas (muestras cúbicas), se realiza con herramientas manuales. Para el labrado y protección de éstas se requieren espátulas, brochas, parrilla, manta de cielo, parafina y brea. Las muestras podrán ser extraídas de las paredes o del piso de la excavación, se limpia el área de donde se va a extraer, se marca la sección deseada y se labran los lados de los cubos de suelo (de aproximadamente 25x25 cm). Posteriormente, la muestra se

cubre con manta de cielo, que se impregna con una mezcla caliente de parafina y brea, mediante el empleo de una brocha.

Finalmente, en la parte superior de la muestra se coloca una etiqueta de identificación. En el registro de campo se anota la descripción y clasificación de los estratos, indicando gráficamente la profundidad de las muestras. A las muestras inalteradas se les pueden practicar pruebas mecánicas de resistencia y de deformabilidad. Además se puede determinar la estratigrafía del subsuelo mediante la inspección de sus paredes mediante técnicas de clasificación visual y al tacto del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Cuando este método sea practicable debe considerársele como el más satisfactorio para conocer las condiciones del subsuelo, ya que consiste en excavar un pozo de dimensiones suficientes para que un técnico pueda directamente bajar y examinar los diferentes estratos de suelo en su estado natural, así como darse cuenta de las condiciones precisas referentes al agua contenida en el suelo. Desgraciadamente este tipo de excavación no puede llevarse a grandes profundidades a causa, sobre todo, de la dificultad de controlar el flujo de agua bajo el nivel freático; naturalmente que el tipo de suelo de los diferentes estratos atravesados también influye grandemente en los alcances del método en sí. La excavación se encarece mucho cuando sean necesarios ademas y haya excesivos traspaleos a causa de la profundidad.

Se llevaron a cabo los siguientes estudios para la estratigrafía: 18 pozos a cielo abierto (PCA 01 a PCA 18) cuya estratigrafía y descripción geotécnica se presenta en el Anexo B. 27 sondeos mixtos (SM), Los perfiles estratigráficos resumidos, así como los perfiles de capacidad de carga neta admisible, en toneladas y en ton/m^2 , para cinco soluciones de cimentación propuestas (pilas cortas de 0.6m y 0.9m de diámetro y zapatas de 1, 2 y 3m de ancho), se presentan en el *Anexo A*. En el sitio del SM-08 con base en las mediciones del sondeo geofísico “*down-hole*” de 70m

de profundidad, con mediciones a cada metro, se determinaron las propiedades elásticas del subsuelo que se consignan en la siguiente tabla:

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso Vol. (ton/m ³)	(Vp/Vs) ²	ν	G (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
0.0 - 1.2	261	78	1.850	11.20	0.45	115	333
1.2 - 3.8	239	85	2.000	7.91	0.43	147	421
3.8 - 6.2	533	191	2.100	7.79	0.43	781	2,228
6.2 -16.8	2359	428	2.150	30.38	0.48	4,015	11,908
16.8 - 42.0	2127	1238	2.203	2.95	0.24	34,418	85,621
42.0 - 67.0	2804	889	2.194	9.95	0.44	17,675	51,051
> 67.0	3859	1312	2.203	8.65	0.43	38,656	110,915

Tabla III Estratigrafía General del Terreno

Donde:

v_p = velocidad de onda longitudinal o de compresión

v_s = velocidad de onda de corte

ν = Módulo de Poisson

G = Módulo de cortante

E = Módulo de elasticidad

Los sondeos de pozo a cielo abierto, se hicieron hasta una profundidad de 2.00 m además se realizó una caracterización del materia para determinar la posible utilización como material de relleno. Adicionalmente, se recuperaron muestras inalteradas de forma cúbica de estratos representativos en los pozos a cielo abierto excavados, con el fin de cuantificar sus propiedades mecánicas en el laboratorio. La ubicación de dichas pruebas se indica en la siguiente tabla

TABLA IV Localización y tipo de muestras.

N°	LOCALIZACIÓN		TIPO
	N	E	
SM-01	91,883.30	126,596.45	SM
SM-02	92,009.90	126,489.50	SM
SM-03	92,011.40	126,398.00	SM
SM-04	91,883.30	126,351.20	SM
SM-05	92,057.00	126,316.10	SM
SM-06	91,912.75	126,325.60	SM
SM-07	91,899.60	126,251.85	SM
SM-08	91,855.30	126,215.45	SM
SM-09	91,929.80	126,200.75	SM
SM-10	91,883.30	126,184.35	SM
SM-11	91,742.80	126,188.25	SM
SM-12	91,836.80	126,148.25	SM
SM-13	91,883.30	126,107.25	SM
SM-14	91,818.90	126,107.25	SM
SM-15	91,712.45	126,107.25	SM
SM-16	91,551.95	126,107.25	SM
SM-17	91,818.90	126,061.90	SM
SM-18	91,787.85	126,032.50	SM
SM-19	91,749.85	126,032.50	SM
SM-20	91,735.10	125,960.05	SM
SM-21	91,712.50	126,227.25	SM
SM-22	91,761.80	126,582.10	SM
SM-23	91,907.60	126,163.10	SM
SM-24	91,556.50	126,605.05	SM
SM-25	91,556.50	126,395.80	SM
SM-26	91,535.50	126,395.80	SM
PCA-01	91,712.75	126,537.75	PCA
PCA-02	91,992.25	126,520.00	PCA
PCA-03	91,883.30	126,473.80	PCA
PCA-04	92,027.60	126,459.00	PCA
PCA-05	91,996.65	126,424.70	PCA
PCA-06	92,026.15	126,371.30	PCA
PCA-07	91,929.65	126,357.95	PCA
PCA-08	91,712.50	126,358.25	PCA
PCA-09	92,034.35	126,334.85	PCA
PCA-10	91,893.30	126,281.80	PCA
PCA-11	91,876.35	126,233.75	PCA
PCA-12	91,905.95	126,221.90	PCA
PCA-13	91,855.30	126,215.45	PCA
PCA-14	91,789.80	126,168.25	PCA
PCA-15	91,929.80	126,130.00	PCA
PCA-16	91,768.80	126,107.25	PCA
PCA-17	91,632.15	126,107.25	PCA
CAL-01	91,712.50	126,616.00	CALA
CAL-02	91,930.10	126,406.50	CALA

3.3 Trabajos de laboratorio

Todos los suelos se componen de tres fases, sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está constituida por las partículas minerales, la parte líquida está representada principalmente por agua, y la gaseosa por aire. Todas las fases ocupan un determinado volumen, y representan un determinado peso, con respecto al total de una muestra. Las relaciones entre el peso de las distintas fases constituyentes del suelo y el volumen que estas ocupan, dan lugar a las relaciones gravimétricas y volumétricas. Es posible determinar estas relaciones en el laboratorio mediante métodos relativamente sencillos y son de gran importancia dentro de la mecánica de suelos, ya que son necesarias para la correcta aplicación de las distintas teorías y brindan significado y sentido físico a las distintas propiedades mecánicas del suelo.

Peso volumétrico

El peso volumétrico en estado natural del suelo o peso específico de la masa de suelo, es la relación entre el peso del mismo y el volumen que ocupa.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

Donde:

W_m : es la masa del suelo.

V_m : es el volumen total de la muestra de suelos.

Determinación del contenido de humedad

El contenido de agua de un suelo o contenido de humedad es la relación entre el agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida, y se expresa en forma de porcentaje dependiendo de las condiciones de humedad del sitio donde se localice el suelo. La cantidad de agua se obtiene mediante la diferencia de peso entre el

suelo en estado natural y el suelo secado en horno. La relación que expresa la humedad de un suelo es la siguiente

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

W_w : es el peso del agua.

W_s : es peso del suelo seco (sólidos)

Peso específico relativo de sólidos

El peso específico relativo, se define como el peso específico del suelo con respecto al peso específico del agua a 4°C, destilada y sujeta a presión atmosférica

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} = \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\frac{W_o}{V_o}}$$

Donde:

W_s : peso de los sólidos.

V_s : volumen de los sólidos.

W_o : peso del agua.

V_o : volumen del agua

Para determinar este parámetro se utilizo un procedimiento donde prácticamente se igualen los volúmenes de agua y de suelo, mediante un matraz de volumen definido, quedando la ecuación expresada en función de los pesos, de la siguiente forma.

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{fw}' W_{fsw}}$$

Donde:

W_{fw} = peso del matraz + agua.

W_{fsw} = peso del matraz con agua y suelo.

El Procedimiento de prueba consiste en llenar un matraz cuyo volumen esta bien definido mediante una marca de enrase, con agua destilada (W_{fw}), posteriormente llenar el mismo matraz con agua y 50gr. De suelo y agua destilada (W_{fsw}). A este matraz se le debe absorber el aire atrapado entre las partículas de suelo mediante una bomba de vacío.

La diferencia de peso entre los dos matraces es el peso del agua desplazada por el suelo, siempre y cuando no haya variación en la temperatura del agua, lo que afectaría su densidad.

Relación de Vacíos

Otra de las relaciones que calculamos fue la relación de vacíos, oquedad o índice de poros, esta se define como la relación que existe entre el volumen de vacíos y el de sólidos del suelo.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Donde:

e : es la relación de vacíos

V_v : es el volumen de vacíos

V_s : es el volumen de sólidos

En la siguiente tabla mostramos los resultados para distintos sondeos

Tabla V Resultados de pruebas triaxiales

SONDEOS	# muestras por sondeo	Cont Humedad %w	Límites de Consistencia	% de Finos	Análisis Granulométrico	Densidad de Sólidos (Ss)
1	18	19	7	11	3	1
2	26	27	4	6	4	1
3	22	23	4	6	2	1
4	23	27	5	7	3	1
5	17	18	-	2	-	2
6	20	23	3	9	4	2
7	26	27	4	7	5	1
8	60	29	5	6	1	-
9	23	26	3	7	4	-
10	26	25	3	5	2	-
11	19	22	-	-	-	-
12	23	26	3	8	2	1
13	20	21	-	2	-	2
14	25	31	4	8	4	1
15	19	20	1	1	-	1
16	19	22	-	-	-	-
17	25	26	2	2	-	2
18	20	24	3	1	-	1
19	22	24	3	1	-	1
20	18	19	3	5	2	-
21	20	27	3	6	-	5
22	26	28	6	9	2	2
23	20	24	3	1	-	1
24	20	22	1	2	-	2
25	21	23	3	5	-	5
26	24	27	2	1	-	1
27	21	25	1	1	-	1

Todas las muestras recuperadas se clasificarán de acuerdo al criterio establecido por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y se efectuarán pruebas índice de los materiales que se seleccionen para precisar su clasificación. A las muestras inalteradas, además de las pruebas índice de clasificación, se les efectuarán ensayos para determinar las propiedades mecánicas de resistencia al esfuerzo cortante y de compresibilidad de los materiales involucrados en la estabilidad de las cimentaciones, así como se cuantificarán sus propiedades dinámicas, relevantes en el diseño de cimentaciones de equipo dinámico.

3.5 Trabajos de Gabinete

Con la información obtenida en los trabajos de campo y laboratorio se elaboraron los perfiles de los sondeos (se incluye uno en el anexo A) y se hizo el análisis correspondiente para proponer la cimentación más adecuada para las estructuras en proyecto, abarcando la revisión de los estados límites de falla y de servicio, reportando gráficas de capacidad de carga admisible para diferentes geometrías y niveles de desplante de cimientos, así como su pronóstico de asentamientos a lo largo del tiempo.

Se calcularán y presentarán los diagramas de empuje de tierras que pudieran presentarse sobre elementos de retención que se construyan debajo del nivel de terreno considerando su respuesta a desplazamientos verticales y laterales, y se detallará el procedimiento constructivo de las cimentaciones, incluyendo los análisis de estabilidad de las excavaciones necesarias para alojar los cimientos o estructuras enterradas y los desniveles que se requieran en los predios.

Por último se darán recomendaciones para el diseño de los pavimentos a partir de las condiciones del sitio y utilizando un vehículo de diseño T3-S2, considerando la recomendación para el diseño y construcción de juntas para ligar los pavimentos nuevos con los existentes.

Por otra parte, se obtuvieron varias muestras de dimensiones que permitieron realizar en ellas, pruebas de compresión triaxial y compresión simple, cuyos reportes se presentan en el *Anexo B*; los resultados se presentan en la siguiente tabla:

TABLA VI Resultados de pruebas triaxiales

Sondeo	Prof (m)	PVHo (ton/m ³)	wo (%)	eo	c (kg/cm ²)
1	8.0	2.25	12.6	0.35	16.0
1	13.0	2.28	12.3	0.33	20.0
5	6.0	2.23	13.6		8.0
9	5.7	2.04	19.5	0.52	1.6
9	6.8	1.94	19.6	0.64	1.2
10	6.2	2.19	15.7	0.40	4.3
13	9.1	2.23	14.4	0.37	5.8
13	9.7	2.20	14.9	0.40	6.4
16	5.9	2.25	13.5	0.34	5.5
17	6.1	2.20	13.9	0.39	9.0
20	6.1	2.15	15.3	0.41	5.6
20	6.8	2.21	15.3	0.36	9.0
24	8.3	2.21	13.8	0.38	8.2
25	10.1	2.17	14.2	0.40	5.6
25	11.9	2.20	15.6	0.39	5.4
27	7.7	2.16	16.3	0.47	6.0
27	11.3	2.18	15.5	0.45	6.2
Promedios		2.20	15.4	0.40	5.9

Donde: **PVHo** = Peso volumétrico natural

wo = contenido natural de agua

eo = relación de vacíos inicial

c = cohesión

Con los resultados de pruebas de compresión triaxial en probetas cuya resistencia ha sido reducida por un muestreo violento, se obtuvo una cohesión promedio de:

$$C = 5.9 \text{ kg/cm}^2 = 59 \text{ ton/m}^2$$

Con los resultados de las pruebas de consolidación del Estrato A se calcularon los hundimientos que tendría una losa de piso cuya presión de contacto con el subsuelo fuera de 1.0 ton/m², los resultados para cada prueba se presentan en la siguiente tabla:

Tabla VII Hundimientos bajo losas de piso con presión de contacto de 1.0 ton/m²

Sondeo	h_{com} (m)	h_{cte} (m)	PV (ton/m ³)	NF (m)	Cr	e_o	p_c (ton/m ²)	σ_o (ton/m ²)	Δσ (ton/m ²)	Δh (cm)
1	1.3	2.05	1.96	0.5	0.02	0.684	12	0.874	1	0.51
2	6.3	-1	1.82	2.6	0.04	0.995	12	3.596	1	1.2
3	3.6	-0.2	1.81	2.4	0.03	0.879	10	2.997	1	0.9
4	4.7	-1.1	1.97	1.7	0.02	0.684	14	2.887	1	0.64
6	2.9	-1.4	1.39	1.7	0.04	0.908	14	1.864	1	2.03
8	2	-1.1	1.4	2.5	0.03	0.894	9	2.05	1	0.91
21	3.7	0.7	1.48	3.8	0.02	0.777	12	2.692	1	0.51
23	3.4	-0.8	1.84	0.4	0.04	0.967	8	1.712	1	1.46
26	4.5	-0.2	1.88	0	0.05	0.881	12	1.936	1	2.12

donde:

h_{com} = espesor compresible

h_{cte} = espesor del corte para dejar nivel de piso de proyecto

PV = peso volumétrico húmedo

NF = profundidad del nivel freático

Cr = Índice de recarga obtenido de las curvas de compresibilidad

e_o = relación de vacíos inicial

p_c = presión efectiva inicial a la mitad del espesor compresible

σ_o = Incremento de presión efectiva considerado

Δh = hundimiento calculado

Conviene precisar que los espesores compresibles se consideran, en los casos pertinentes, el corte que se realizará para alcanzar el nivel de piso de proyecto. De lo anterior puede concluirse que las estructuras ligeras no sensibles a hundimientos pueden soportarse mediante losas de piso. Mientras que las estructuras ligeras sensibles a hundimientos podrán apoyarse sobre pilas

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS MECÁNICO PARA DISEÑAR LAS CIMENTACIONES

Con base en la exploración y el muestreo, así como en los resultados de laboratorio se establece que los siguientes estratos para el sitio dónde se instalará la Planta Criogénica están conformados de la siguiente manera:

Estrato A

Constituyendo el subsuelo superficial se tiene una capa promedio de 3.5m de espesor promedio, marcadamente heterogénea tanto en composición como en propiedades mecánicas, formada por depósitos aluviales predominantemente finos, de compacidad y consistencia bajas y muy variables, como puede verse en los perfiles stratigráficos y pruebas de laboratorio (Anexos A y B).

Estrato B

Bajo el estrato anterior existe una capa promedio de boleos y grava de 3.3m de espesor promedio, cuya compacidad se desconoce y que descansa sobre el.

Estrato C

Constituido, hasta una profundidad que excede los 70m (a los que llegó el sondeo SM8), es un suelo de consistencia muy dura.

En la siguiente tabla se presentan los valores estadísticos de los espesores de suelos encontrados en los 27 sondeos mixtos:

Tabla VIII Estratigrafía General del Terreno

Estrato	Suelo	Espesor (m)			
		Promedio	Máximo	Mínimo	Desv. Estándar
A	Capa constituida por mezclas heterogéneas de arcilla, limo y/o arena fina	3.5	6.2	0.6	1.6
B	Boleos y grava	3.3	6.2	1.8	0.9
C	Lutita	Mayor de 70m en el sondeo SM-08			

A partir de la resistencia a la *penetración estándar*, suponiendo en función de su inspección directa que los suelos son puramente cohesivos, o puramente friccionantes, tomando en cuenta la resistencia a la penetración estándar normalizada **N**, habiendo limitado **N** (resistencia a la penetración estándar medida en campo) a 50 golpes, se asignaron valores de cohesión (c):

$$c = N / 1.6 \quad [\text{ton/m}^2]$$

Esta expresión es utilizada únicamente cuando el numero de golpes es mayor o igual a 50. **$N \geq 50$**

y ángulo de fricción

$$\phi^\circ = 27 + 0.36 \cdot N$$

A partir de lo anterior y si se tiene en cuenta que la resistencia a la penetración estándar de la lutita medida en todos los sondeos fue muy superior a los 50 golpes, limitando a dicho valor esa resistencia, obtenemos una cohesión de:

$$c = 50 / 1.6 = 31.2 \text{ ton/m}^2$$

4.1 Clasificación de suelos

La clasificación de los suelos fue uno de los primeros objetivos de la mecánica de suelos. Antiguamente dicha clasificación se hacía en base a criterios puramente descriptivos. Actualmente la clasificación de suelos esta basada en las propiedades mecánicas de los suelos. El sistema que utilizamos para la clasificación de los distintos estratos, (SUCS) es actualmente el sistema más empleado en el mundo, y funciona dividiendo el suelo en dos grandes grupos. El primer grupo es la fracción "gruesa", que esta conformada por las partículas mayores a la malla #200 (0.074mm). Y el segundo es la parte "fina", la cual esta conformada por todas aquellas partículas menores a la malla 200.

Se considera un suelo grueso, cuando el 50% del peso de una muestra queda retenido en la malla 200. Los suelos gruesos se subdividen en:

- a) gravas de símbolo genérico G.
- b) arenas, de símbolo genérico S.

Las gravas y las arenas se separan con la malla #4 (4.76mm). Se considera como grava a todo el material retenido en dicha malla, El material que pasa la malla #4 y es retenido en la malla # 200, es una arena.

Estos grupos G Y S, se subdividen en cuatro grupos más, en función de su gama de tamaños, de la presencia de finos y la plasticidad de los mismos. De esta forma a cada grupo formado se le asigna un símbolo conformado por dos letras mayúsculas. Cuando el 50% del peso total de la muestra traspasa la malla # 200, se dice que el suelo es fino. De la misma forma que los suelos gruesos, los finos se subdividen en tres grupos, en función de su índice plástico (IP). Estos tres grupos son:

- a) Limos inorgánicos, de símbolo genérico M.
- b) Arcillas inorgánicas, de símbolo C.
- c) Arcillas y limos orgánicos de símbolo genérico O.

Al igual que los suelos gruesos, el símbolo consta de dos letras, esta segunda letra es asignada en función de su grado de compresibilidad, definida por el límite líquido (LL), esta segunda letra puede ser H, para una alta compresibilidad o L, para baja compresibilidad.

Las divisiones entre los grupos de suelos finos son claramente definidas en la carta de plasticidad.

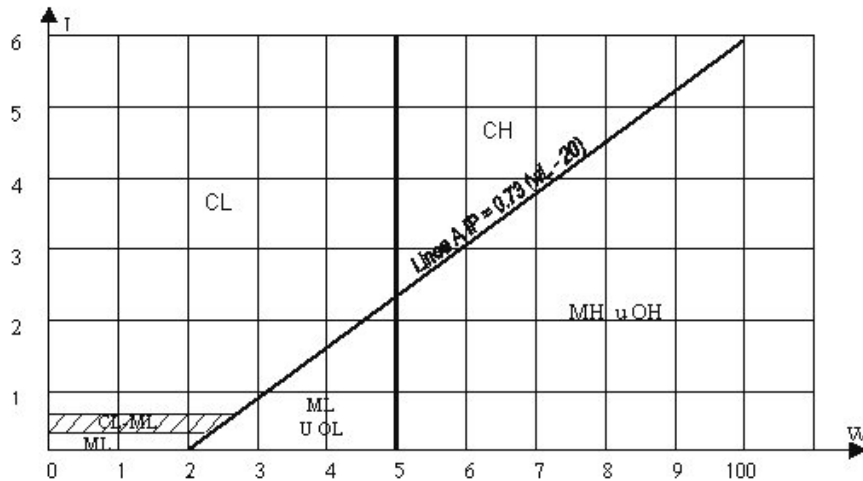


Figura XII Carta de plasticidad

Por ultimo, se obtuvieron unas calas sobre los pavimentos existentes para determinar su estructura, el grado de compactación de las capas, el peso volumétrico seco máximo y el contenido de humedad optimo, con el fin de conocer la estructura real del pavimento y dar recomendaciones para el diseño y la construcción de juntas para ligar los pavimentos nuevos con los existentes Todas las muestras se clasificarán en campo, se empacarán para evitar su intemperismo y preservar su estructura; y se trasladarán al laboratorio para someterlas a ensayos de laboratorio.

4.2 Diseño de pavimentos

Es primordial diseñar una base o sub-base ya que su principal función es:

- Reducir costo de pavimento disminuyendo el espesor
- Proteger a la base aislándola de la tercería
- Proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad
- Transmitir y distribuir cargas a las terrecerías

La base es la capa de material que se construye sobre la sub-base y se calculan por medio de las pruebas de consolidación de laboratorio.

a) *Material para Base y subrasante.*

La calidad del soporte esta dada por:

El modulo de reacción K de la capa subrasante

Base o sub-base capa de material directamente debajo de la losa que proporciona una superficie de trabajo estable.

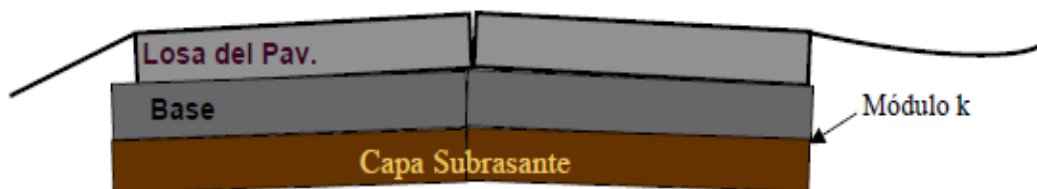


Figura XIII capa subrasante y sub-base

Clasificación SUCS: GP-GC y GP-GM

Granulometría: Grava = 75%, Arena = 19%, Finos = 6%

$C_u = 112$, $C_c = 9.4$

Material que pasa por Malla No. 40

$LL = 21.4\%$; $I_p = 8.9\%$; $LP = 12.5\%$; $CL = 1.7\%$

Donde:

C_u = coeficiente de uniformidad

Cc = coeficiente de curvatura

LL = límite líquido

LP = límite plástico

Ip = índice de plasticidad

CL = contracción lineal

Prueba de compactación (Proctor estándar):

Peso volumétrico seco = 2,136 kg/m³

ω_{opt} = 6.2% (contenido óptimo de agua)

%exp. = 0.16% (expansión)

VRS = 65% (valor relativo de soporte)

b) *Módulo de reacción (k):*

Tomando en cuenta el valor de VRS, las características granulométricas del material y las características de plasticidad del material que pasa la malla No.40, se consideró un módulo de reacción k para las capas de subrasante y subbase de:

$k = 12$ a 15 kg/cm^3

c) *Subbase*

Espesor recomendado para subbase (e_{sb}):

$e_{sb} = 15 \text{ cm}$

Grado de compactación = 100%

d) *Espesor de pavimento y resistencia del concreto*

De la gráfica de diseño para carga en *tandem*, de la referencia citada, se obtienen los siguientes valores de MR:

Tabla IX Espesor de pavimento y resistencia a la tensión del concreto (MR)

Módulo de reacción, k (kg/cm ³)	Espesor pavimento (cm)	MR (actuante) (kg/cm ²)	MR (requerido) (kg/cm ²)	f'c (aprox.) (kg/cm ²)
15	10	32	56.1	470
	12.5	23.5	41.2	345
	15	18	31.6	265
12	10	33	57.9	485
	12.5	24.5	43	360
	15	19	33.3	280

La resistencia del concreto (f'c) se estimó con la siguiente relación empírica*:

$$MR = 0.12 f'c$$

En la tabla 6 se consignan las resistencias en compresión del concreto, requeridas para formar pavimentos de concreto simple de 10, 12.5 y 15 cm de espesor, capaces de soportar diferentes números de pasadas del vehículo de diseño. Asimismo se presentan en la sección las recomendaciones para la formación de juntas entre las losas del pavimento, ver tabla de normatividades para pavimentos en anexo.

4.3 Cálculo de la Capacidad de Carga neta última

Válida, en este caso, para la base de cualquier cimentación (zapatas, columnas, etc.), la capacidad de carga se determina mediante las ecuaciones Terzaghi*

$$a = e^{(0.75\pi - \phi/2)\tan\phi}$$

$$N_q = a^2 / 2 \cos^2(45 + \phi/2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$K_{py} = 1.439 N_c$$

$$N_y = (\tan \phi / 2) [(K K_{py} / \cos^2 \phi) - 1]$$

Aplicando las tablas y ecuaciones de Terzaghi*, (ecuaciones y tablas en anexo) se tienen los siguientes valores de capacidad de carga neta admisible q_a : para el cálculo de q_u (capacidad de carga neta última) para zapatas o columnas cuadradas o circulares es:

$$q_u = 1.3 c N_c + \sigma_{ef} (N_q - 1) + 0.4 \gamma_h B N_\gamma$$

donde:

c = cohesión (usando los valores obtenidos a partir de la resistencia a la penetración estándar)

σ_{ef} = esfuerzo vertical efectivo, multiplicada por el peso volumétrico efectivo del suelo sobre el nivel de desplante alrededor de la zapata.

B = Ancho o diámetro de la zapata o columna a utilizar, en metros.

γ_h = peso volumétrico efectivo del suelo bajo la profundidad de apoyo de la cimentación.

N_c, N_q, N_γ = Factores de capacidad de carga que dependen del ángulo de fricción ϕ , conforme a lo siguiente:

- a) Si $\phi = 0^\circ$: $N_c = 5.7, N_q = N_\gamma = 0$
- b) Cuando $\phi > 0^\circ$:

TABLA X Capacidades de carga

Cohesión obtenida con	C (ton/m ²)	Qu (ton/m ²)	$q_a = q_u/3$ (ton/m ²)
Penetración Estándar	31.2	165.4	55
Pruebas triaxiales	59	312.7	104

Lo que significa que las columnas pueden diseñarse para una capacidad de carga admisible por punta de

$$q_a = 55 \text{ ton/m}^2$$

y a ella añadir una *capacidad de carga por adherencia* (q_s) del fuste igual a la cohesión por un factor de resistencia de 0.4, por lo que:

$$q_s = (31.2)(0.4) = 12.5 \text{ ton/m}^2$$

4.4 Módulos de Reacción

Teniendo los valores de carga y aplicando los factores en base a las tablas de Terzaghi podemos estimar los valores para los módulos de reacción. Para el diseño estructural de las cimentaciones podrá asignarse a la lutita los siguientes valores de Módulo de reacción horizontal (k_h) y vertical (k_v): módulos de reacción a partir de Q_u de las ecuaciones de Terzagui Ver grafica en anexo

Tabla XI Módulos de reacción

Estrato	k_h (MN/m ³)	k_v (MN/m ³)
Relleno especificado	230	125
A (superficial)	10	5
B (grava y boleos)	150	75
C (lutita)	200	100

Las muestras que se obtienen tanto por los sondeos como a través de los PCA permiten describir y clasificar los estratos debiendo aplicarse siempre al sistema unificado de clasificación de suelos.

:

Con un criterio fundado en las pruebas triaxiales, las pilas pueden diseñarse para una capacidad de carga admisible por punta de

$$q_a = 55 \text{ ton/m}^2$$

y en ella se incluye la *capacidad de carga por adherencia* (q_s)

Para el diseño estructural de las cimentaciones podrá asignarse ala capa del estrato C los siguientes valores de Módulo de reacción horizontal (k_h) y vertical (k_v):

$$k_h = 200 \text{ MN/m}^3$$

$$k_v = 100 \text{ MN/m}^3$$

CAPITULO V

5. RECOMENDACIONES DE CIMENTACIÓN

Consideramos recomendable que todas las estructuras importantes y las sensibles a hundimientos se apoyen mediante pilas cortas, profundizadas cuando menos dos metros dentro de la lutita.

La recomendación anterior, por otra parte, también redundaría en una importante reducción del costo y del tiempo de construcción, ya que disponiéndose de un amplio terreno libre y siendo muchas las cimentaciones por construir, la perforación y colado de pilas cortas (menos de 10m de profundidad), representa una solución mucho más práctica, rápida, económica y limpia que otra solución superficial que requiera importantes volúmenes de excavación y relleno compactado.

No obstante la recomendación de las pilas, calculamos también soluciones para diferentes tamaños y profundidades de zapatas. Así, en los perfiles geotécnicos de los sondeos se presentan las capacidades de carga neta admisible versus la profundidad de apoyo para

- a) pilas de $0.6m$ y $0.9m$ de diámetro y
- b) zapatas de $1m$, $2m$ y $3m$ por lado. En el capítulo siguiente de este informe se presenta la teoría en que se sustentan las capacidades de carga graficadas.

5.1 Pilas (columnas)

Las pilas son elementos de cimentación colados dentro de una perforación previamente realizada, generalmente cilíndrica, que puede construirse con o sin refuerzo, con o sin campana y se utiliza cuando las cargas de la superestructura son importantes (figura 13).

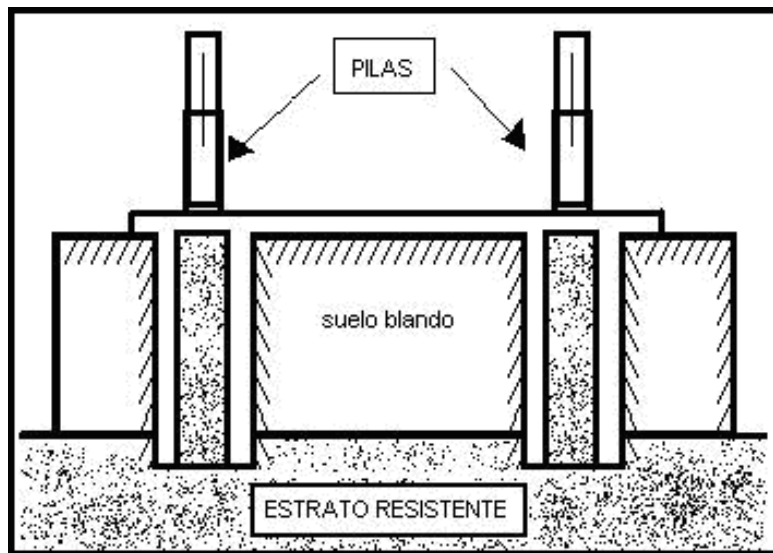


Figura XIV Pilas se cimentación

Ventajas y limitaciones de las pilas comparadas con los pilotes

Ventajas:

- a) La pila sustituye a muchos pilotes y se elimina la necesidad de dados o zapatas sobre pilotes.
- b) En las cimentaciones a base de pilas se evita el ruido causado por los martinetes, así como las vibraciones y los desplazamientos que sufre el suelo

durante el hincado de los pilotes, que en algunas obras es un factor muy importante

c) En la construcción de pilas puede perforarse a través de gravas , boleas y pequeñas rocas, lo que en el caso de pilotes los desviarían y causarían numerosos problemas tales como: sustituir pilotes, recortarlos, etc.

d) son más viables económicamente ya que reducen costo y tiempo en construcción

Desventajas:

a) No todos los suelos son adecuados para construir pilas en forma eficiente y económica.

b) Es importantísimo una buena supervisión técnica, especialmente antes y durante el colado de cada pila.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de participar en la ejecución del estudio de mecánica de suelos para una planta criogénica y de presentar en este trabajo en forma detallada las etapas que se llevaron a cabo, para concluir dicho estudio, me permito señalar los aspectos relevantes que un ingeniero químico en su función como responsable de un proyecto. Deberá de vigilar cuidadosamente, para la etapa de evaluación de las características geológicas, en lo referente a:

- Zona sísmica
- Condiciones climatológicas
- Ubicación
- Hidrología
- Composición del suelo

Los aspectos anteriores quedarán perfectamente establecidos en las bases de diseño de la planta criogénica y serán un factor primordial para la preparación de sitio en la etapa de construcción de la planta, especialmente en lo relativo al material que se utilizará como relleno y a las capas de pavimentos para los caminos de acceso.

Con los valores generados a partir de los cálculos de las pruebas de laboratorio se concluye que las estructuras deberán apoyarse, directa o indirectamente, sobre columnas que penetren cuando menos dos metros dentro del estrato C

El subsuelo del terreno en que se construirá la Planta Criogénica, está formado por los tres estratos siguientes:

Estrato A

Constituyendo el subsuelo superficial se tiene una capa promedio de 3.5m de espesor promedio. Capa superficial constituida por mezclas heterogéneas de arcilla, limo y/o arena fina

Estrato B

Bajo el estrato anterior existe una capa promedio de boleos y grava de 3.3m de espesor promedio. Capa constituida por mezclas de boleos y grava.

Estrato C

Constituido, hasta una profundidad que excede los 70m (a los que llegó el sondeo SM8), es un suelo de consistencia muy dura (lutita).

Con base en lo anterior, se concluye las siguientes capacidades de carga admisible, a compresión (Qa) y a tensión (Ta), para la construcción de columnas de 0.6, 0.9 y 1.2 m de diámetro:

Tabla XII Dimensiones de diseño de la pila

longitud de la pila (m)	Diámetro de la Pila					
	0.6 m		0.9 m		1.2 m	
	Qa (ton)	Ta (ton)	Qa (ton)	Ta (ton)	Qa (ton)	Ta (ton)
11.5	39	40	74	64	119	90
12	43	45	80	70	126	99
12.6	47	49	86	77	135	108
13.2	52	54	93	84	144	118

En la fase de exploración y muestreo es recomendable que el responsable del proyecto conozca los métodos que se emplearan en las pruebas para la determinación de las características geotécnicas. Si bien el especialista lleva a cabo la selección del método a utilizar, el ingeniero químico como líder del proyecto podrá corroborar que efectivamente se llevo a cabo el procedimiento para este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Seed H.B. and Idriss I.M., 1970, Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. College of Engineering University of California, Los Angeles, CA, Report EERC 70-10.
2. Schnabel P.B., Lysmer J. and Seed H.B., 1972, SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, USA.
3. Figueroa, J., 1970, Catálogo de sismos ocurridos en la República Mexicana, Instituto de Ingeniería, UNAM, informe No. 272, México, D.F.
4. Molnar P., 1973, Fault plane solutions of earthquakes and direction of motion in the Gulf of California and on the Rivera fracture zone, Geological Society of America Bulletin, V. 84, pp 1651-1658.
5. Seed H.B., Romo M.P., Sun J.J., Jaime A. and Lysmer J., 1987, The Mexico earthquake of September 19, 1985 - Relationships between soil conditions and Earthquake ground motions, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division, ASCE, V 94, No SM1.
6. Finn L. and Nichols A., 1988, Seismic response of long period: lessons from the September 19, 1985 Mexican earthquake, Can. Geotech. J. 25, pp 128-137.
7. Zúñiga R. y Tapia R., 1992, Regionalización sismotectónica de la República Mexicana, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
8. C.F.E., Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1993, Manual de diseño de obras civiles, diseño por sismo, México.
9. Consejo de Recursos Minerales, 1994, Monografía Geológico – Minera del Estado de Veracruz, Secretaria de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaria de Minas, Pachuca, Hidalgo, México.
10. C. F. E. (1990): *Manual de diseño de obras civiles* Sección geotecnia. México.

11. Juárez Badillo. E. y Rico, A., *Mecánica de Suelos, tomo II, cap. X*. Limusa. México, D.F. 1973
12. www.ingenieracivil.com/2008_04_01_archive.html
13. IMCYC Guía para el diseño y construcción de Pavimentos Rígidos, 1998
PEMEX 3.123.03 (1991) Pavimentos de concreto
14. SCT Normas para muestreo y pruebas de Materiales, Equipos y Sistemas, parte 6.01, Carreteras y Autopistas, título 6.01.01, “Terracerías”, 1986
15. CEMEX Pavimentos de concreto, 2000
16. Packard, R. G. Design of Concrete Airport Paviments. PCA. Engineering Bulletin, Chicago. Ill., 1973).
17. <http://www.citemex.com/>
18. <http://www.arqhys.com/construccion/construccion-diccionario.html>
19. <http://www.pemex.com>

ANEXOS

A continuación se muestra un diagrama de flujo de proceso de una planta Criogénica (Proceso para la recuperación de etano y licuables).

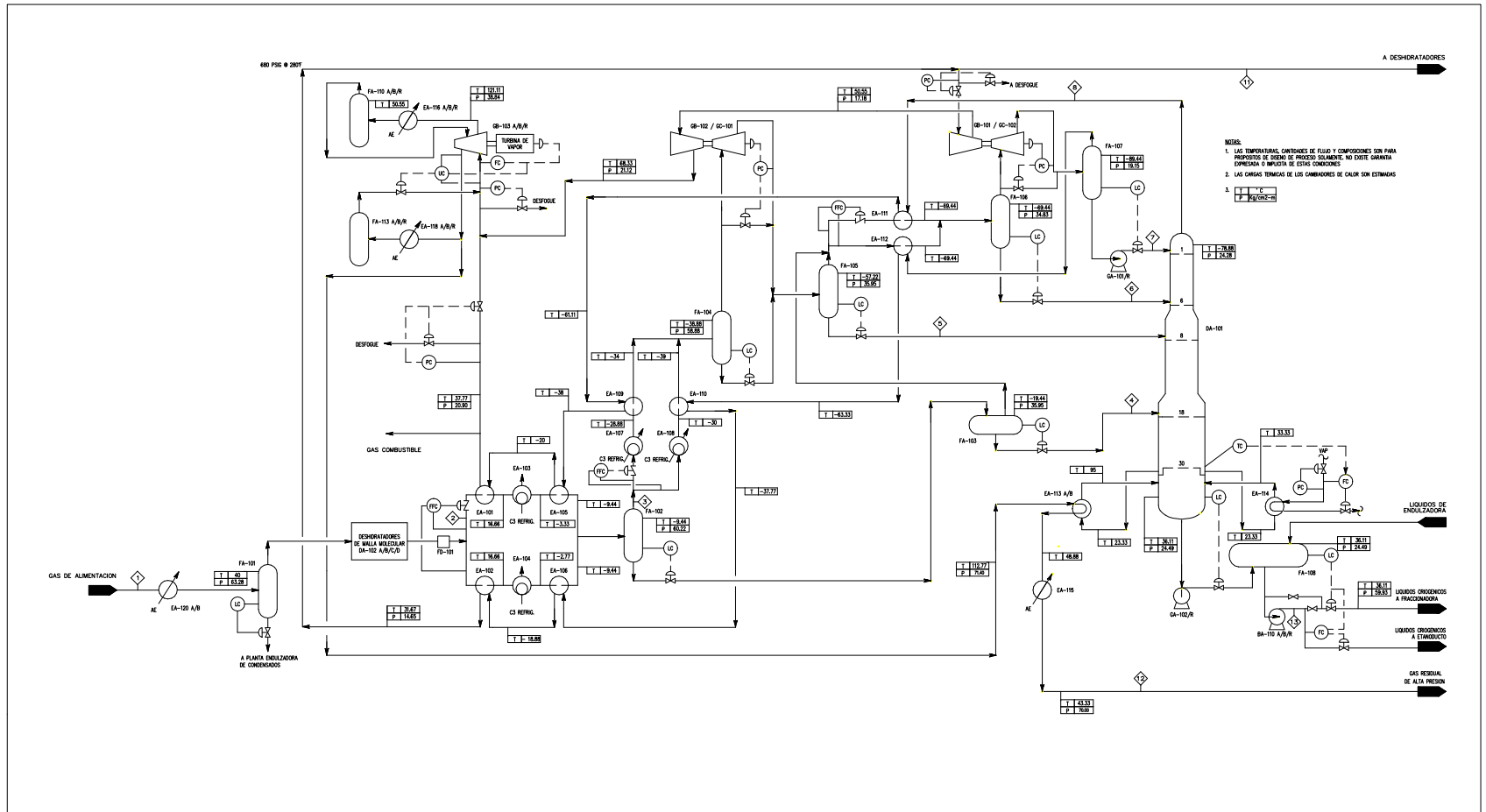


Figura I Diagrama de Flujo de Proceso

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	GRAVAS LIMPIA Poco o nada de partículas finas	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.	
		GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* GM	d u		Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
		ARENAS LIMPIA Poco o nada de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
		ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* SM	d u		Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
		GRAVAS MAL GRADUADAS, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		GRAVAS ARCILLOSAS, mezclas de gravas, arena y arcilla	GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4	PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	ARENAS MAL GRADUADAS, arena con gravas, con poca o nada de finos.	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7. Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles. Cu = D_{60} / D_{10} mayor de 6 ; Cc = $(D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3. No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW. LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7. Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
			ARENAS ARCILLOSAS, mezclas de arena y arcilla.	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	
			ARENAS LIMOSAS, mezclas de arena y limo.	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	
			ARENAS GRUESAS, mezclas de arena y grava.	SG	Arenas gruesas, mezclas de arena y grava.	
			ARENAS MUY GRUESAS, mezclas de arena y grava gruesa.	SGH	Arenas muy gruesas, mezclas de arena y grava gruesa.	
			ARENAS MUY GRUESAS, mezclas de arena y grava gruesa.	SGH	Arenas muy gruesas, mezclas de arena y grava gruesa.	
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕ Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.) 		
		CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.			
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
		MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomeos, más elásticos.			
	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.			
		P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.			
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS					

* CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.
 ⊕ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.
 * LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d Y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS ÚNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

Figura 14 Simbología SUCS del tipo de suelo

Simbología

GP - Grava mal graduada con menos del 5% de finos

GW - Grava bien graduada con menos del 5% de finos

GM - Grava con finos limosos (el porcentaje de finos es mayor al 12%)

GC - Grava con finos arcillosos (el porcentaje de finos es mayor al 12%)

GP-GM- Grava mal graduada limosa (el porcentaje de finos 5-12%)

GP-GC- Grava mal graduada arcillosa (el porcentaje de finos 5-12%)

GW-GM- Grava bien graduada limosa (el porcentaje de finos 5-12%)

GW-GC- Grava bien graduada arcillosa (el porcentaje de finos 5-12%)

Arena (Sand)

SP - Arena mal graduada con menos del 5% de finos

SW - Arena bien graduada con menos del 5% de finos

SM - Arena con finos limosos (el porcentaje de finos es mayor al 12%)

SC - Arena con finos arcillosos (el porcentaje de finos es mayor al 12%)

SP-SM - Arena mal graduada limosa (el porcentaje de finos 5-12%)

SP -SC - Arena mal graduada arcillosa (el porcentaje de finos 5-12%).

SW-SM -Arena bien graduada limosa (el porcentaje de finos 5-12%)

SW-SC - Arena bien graduada arcillosa (el porcentaje de finos 5-12%)

Suelos finos:

MI - Limo de baja compresibilidad

MH - Limo de alta compresibilidad CI - Arcilla de baja compresibilidad

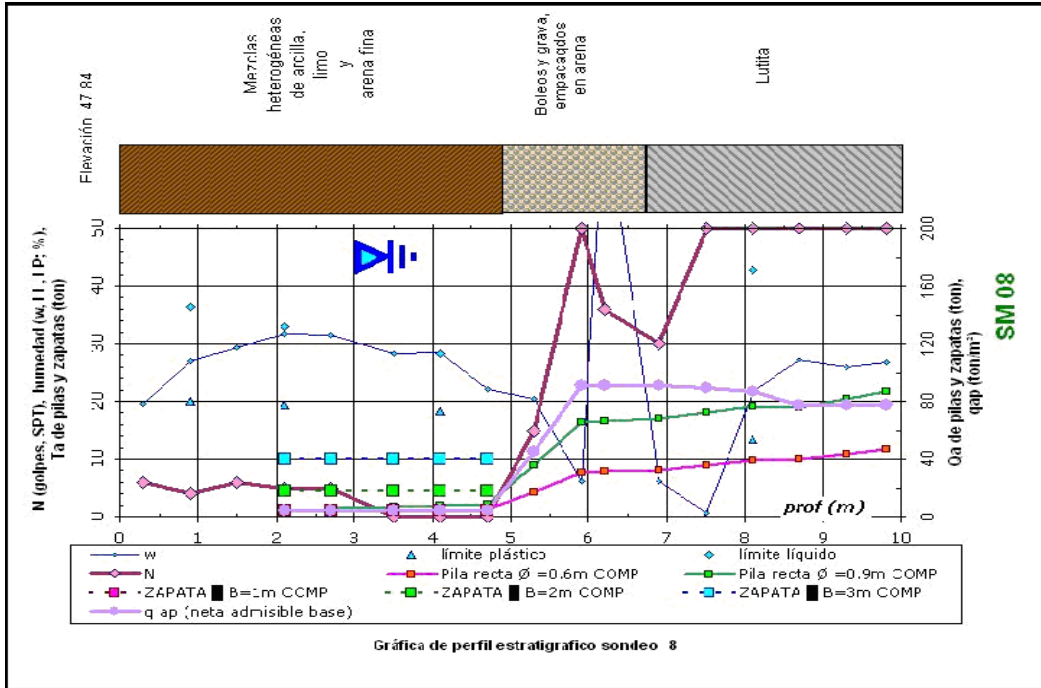
CH - Arcilla de alta compresibilidad

OI - Suelo orgánico (puede ser limo o arcilla) de baja compresibilidad

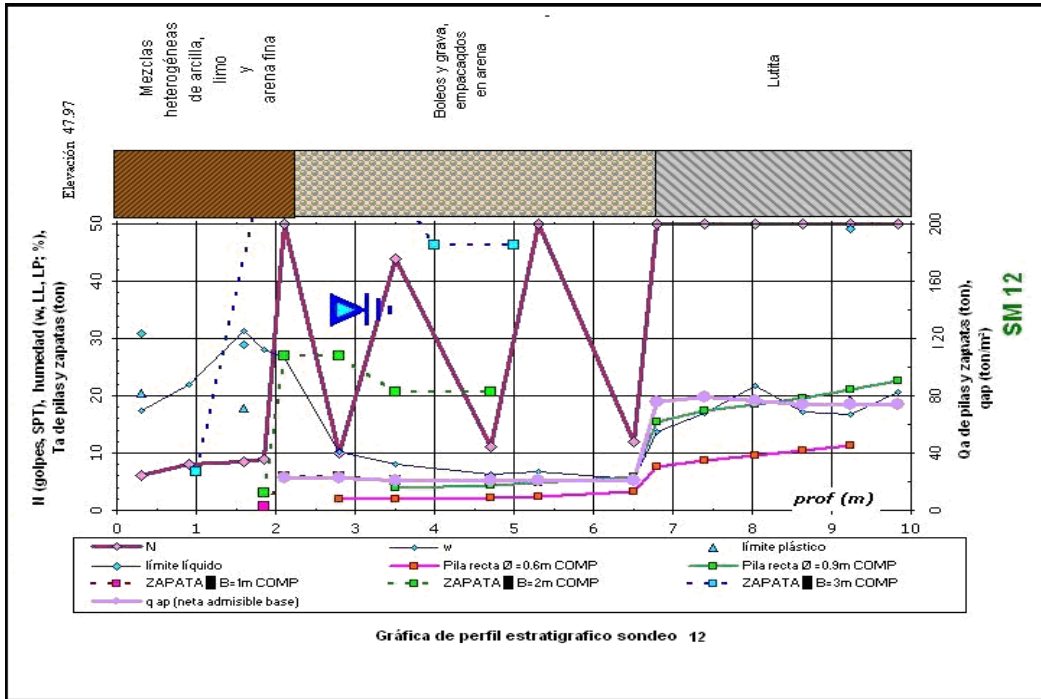
OH - Suelo orgánico de alta compresibilidad

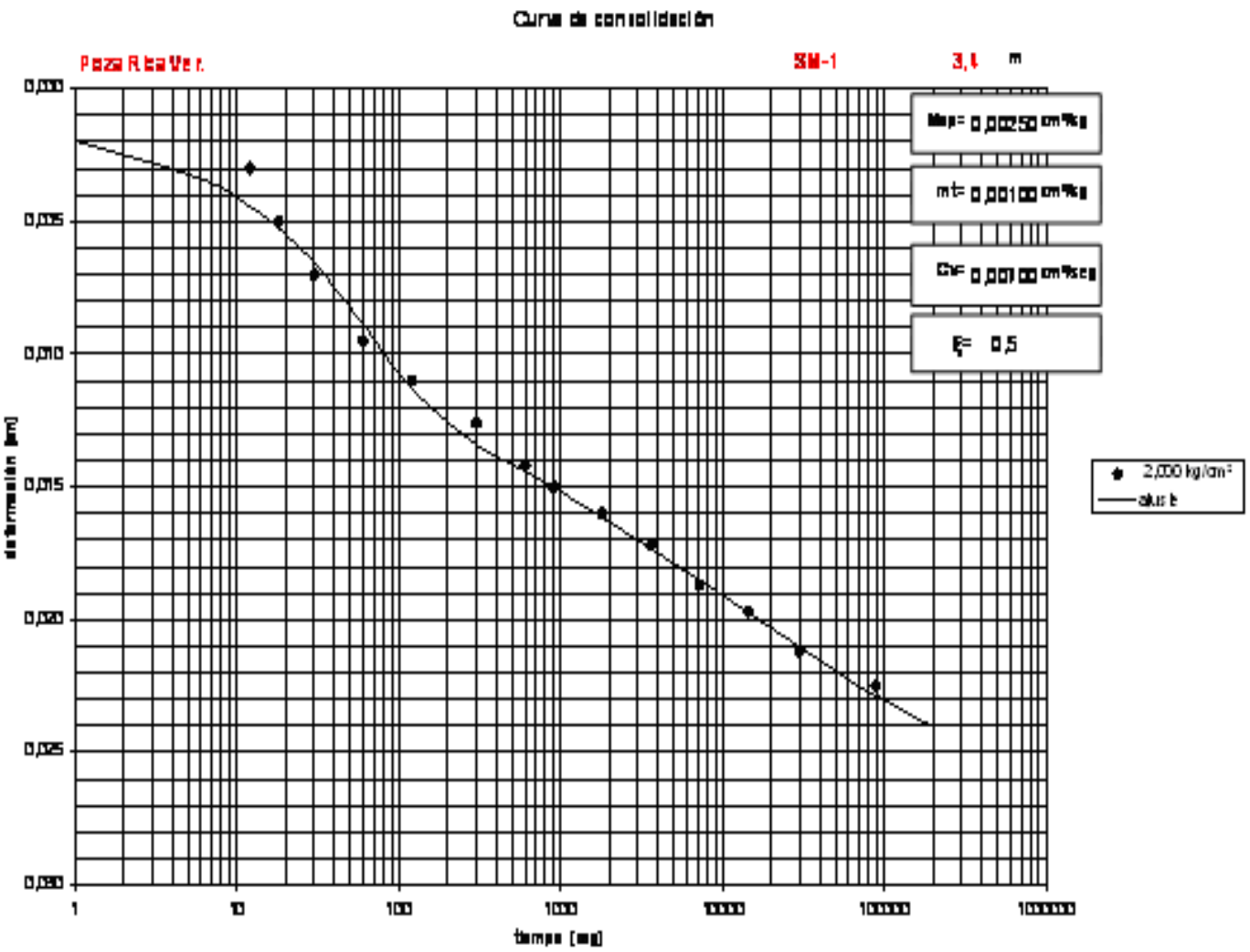
A. Perfiles estratigráficos y geotécnicos

SONDEO SM08

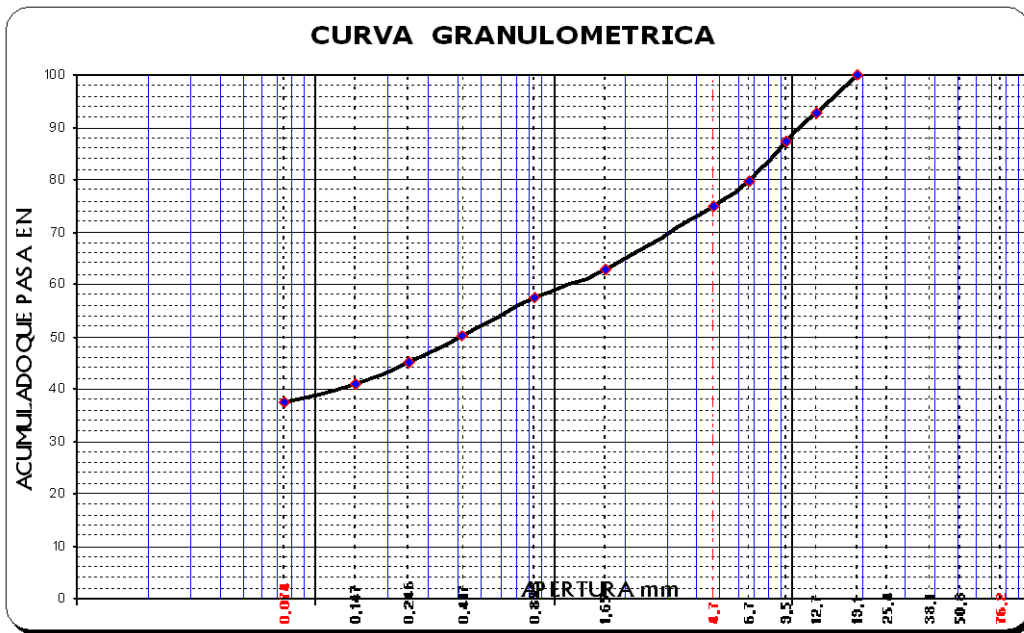


SONDEO SM12





Gráfica consolidación unidimensional para 2000 Kg/cm²

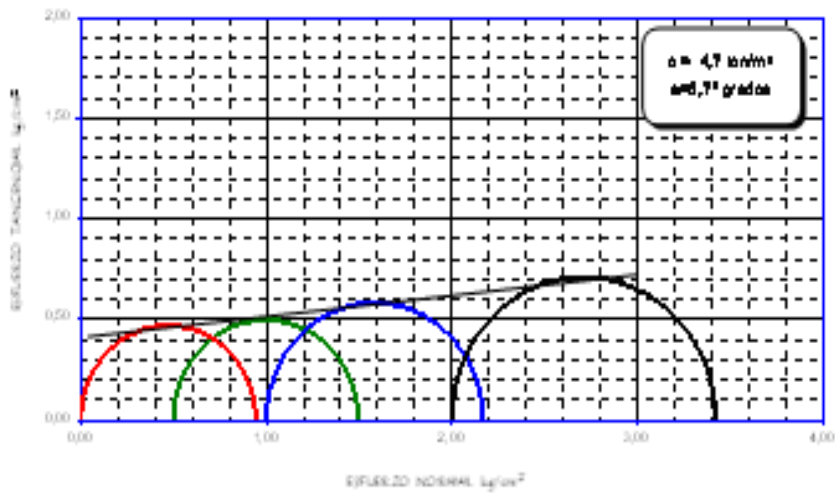
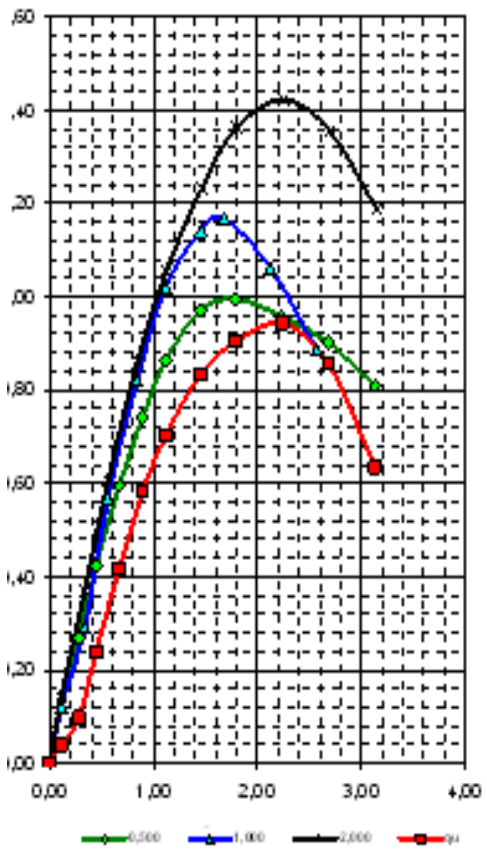


Gráfica granulometría muestra 6 sondeo 2 (roca acumulada Vs Mallas)

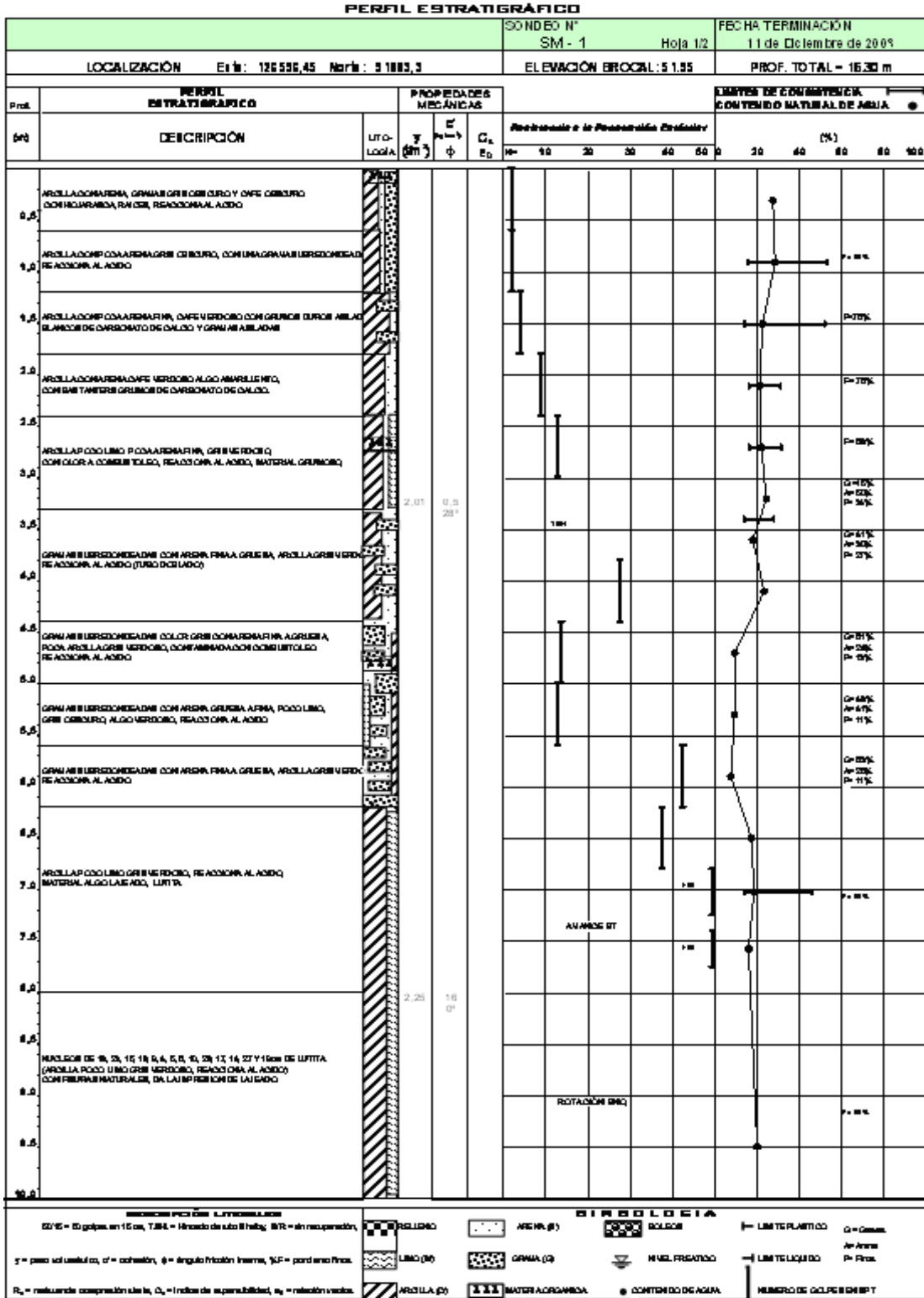


Gráfica Limite de consistencia, muestra 12 SM 1 %W vs No. De golpes

Gráficas de Compresión triaxial con círculos de Mort



PBA. No.	P.V.H σ_3 kg/cm ²	P.V.S σ_1 kg/cm ²	σ_1 %	e_i	G_{σ} %	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ MPa kg/cm ²
1	18,58	1806	23,5	-1,000	0,0	0,500	1,00
2	18,72	1824	22,8	-1,000	0,0	1,000	1,17
3	19,13	1827	25,3	-1,000	0,0	2,000	1,42
ap	18,49	1486	24,3	-1,000	0,0	0,000	0,94
TRM.	1873	1511	24,0	-1,000	0,0	3,5 =	0,880



Perfil estratigráfico del sondeo No. 1

ANEXOS B

Foundation Analysis and Design

Terzaghi (1943)

$$q_{ult} = cN_c s_c + \gamma D_f N_q + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma$$

donde

$$N_q = \frac{\exp\left(2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)\tan(\phi)\right)}{2\cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)}$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot(\phi)$$

$$N_\gamma = \frac{\tan(\phi)}{2}\left(\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2(\phi)} - 1\right)$$

N_q^* es el coeficiente de capacidad de carga definido por:

$$N_q^* = N_{\min} + L_e \frac{N_{\max} - N_{\min}}{4B \tan(45^\circ + \phi/2)}$$

cuando $L_e / B \leq 4 \tan(45^\circ + \phi/2)$; o bien

$$N_q^* = N_{\max}$$

cuando $L_e / B > 4 \tan(45^\circ + \phi/2)$

Tabla 3.3 Valor de N_{\max} y N_{\min} para el cálculo de N_q^*

ϕ	20°	25°	30°	35°	40°	45°
N_{\max}	12.5	26	55	132	350	1000
N_{\min}	7	11.5	20	39	78	130

Factores de capacidad de carga de Terzaghi

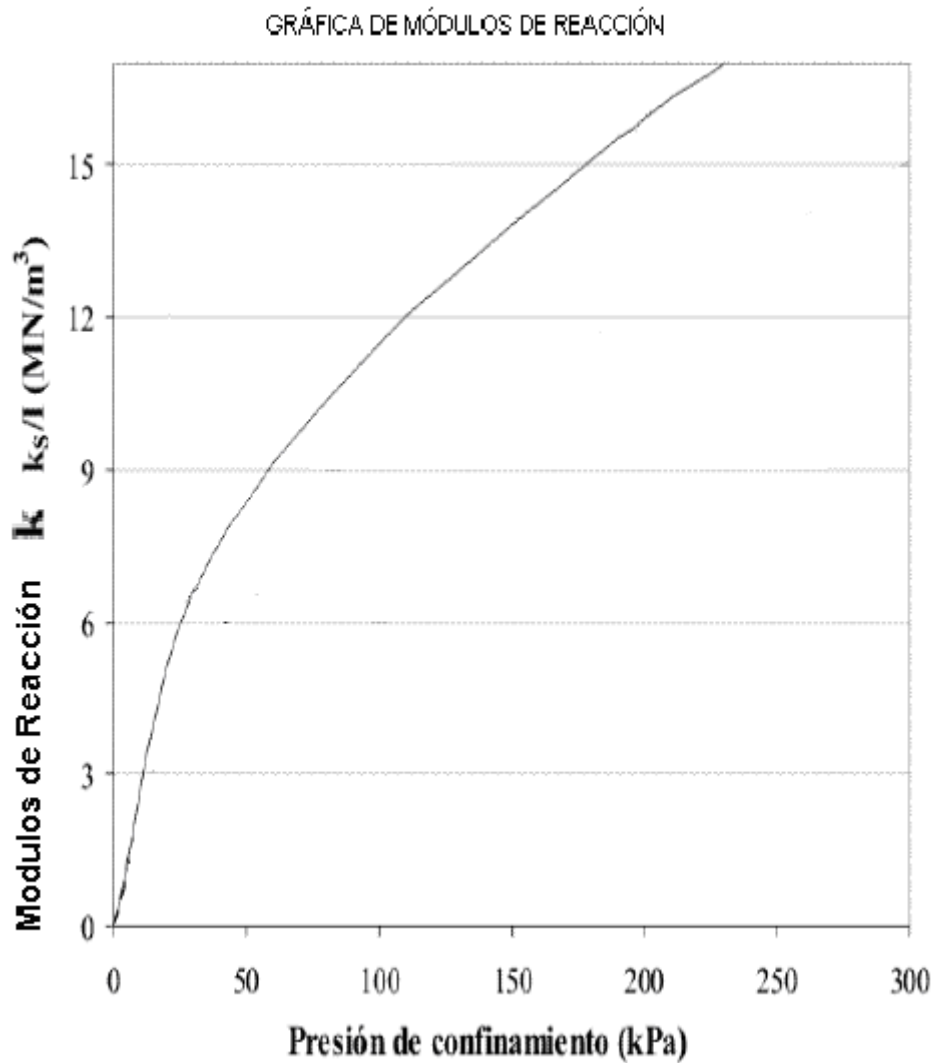


Figura módulos de reacción a partir de Q_u de las ecuaciones de terzagui

Consideraciones de diseño

- a. Consideraciones ambientales.- Los cambios en la temperatura y en la humedad inducen movimientos de la losa, resultando en concentraciones de esfuerzos y en alabeos.

- b. Espesor de losa.- El espesor del pavimento afecta los esfuerzos de alabeo y las deflexiones para la transferencia de carga.
- c. Transferencia de carga.- La transferencia de carga varía para cada tipo de junta, por lo que el tipo y el tamaño de las barras influyen en el diseño de las juntas.
- d. Tránsito.- La clasificación, canalización y el predominio de cargas en el borde influyen significativamente en los requerimientos de transferencia de carga para el comportamiento a largo plazo.
- e. Características del concreto.- Los componentes de los materiales afectan la resistencia del concreto y los requerimientos de juntas, los materiales seleccionados para el concreto determinan las contracciones de la losa.
- f. Tipo de subrasante o terreno de apoyo.- Los valores de soporte y las características friccionantes en la interfase del pavimento con el terreno de apoyo para diferentes tipos de suelos afectan los movimientos y el soporte de las losas.
- g. Características del sellador.- El espaciamiento de las juntas influye en la selección del tipo de sellador.
- h. Drenaje
- i. Factores de Diseño

Definiciones normativas para pavimentos

a) Pavimento rígido Conjunto de losas de concreto, con o sin refuerzo, interconectadas mediante juntas transversales y longitudinales, y conectores de acero, apoyadas sobre un suelo mejorado que constituye la estructura de apoyo formada por la base y la sub-base, las cuales a su vez se apoyan sobre la sub-rasante.

b) Terraplén

Estructura formada por capas compactadas de suelo colocado sobre el terreno natural, que tiene como objetivo principal dar un determinado nivel de proyecto, así como el mejoramiento de las condiciones de apoyo del pavimento.

c) Capa subrasante

Nivel superior del terraplén o del terreno natural, si no hay terraplén, sobre el cual se coloca la capa sub-base o la base. Actúa como el terreno de cimentación del pavimento, puede ser el terreno natural, debidamente recortado y compactado; o puede ser, material de buena calidad seleccionado para relleno, debido a los requerimientos del proyecto, cuando el suelo natural es deficiente.

d) Capa Sub-base

Estructura de suelo formada de una capa de materiales pétreos bien graduados, construida sobre la capa subrasante, la cual cumple con los mismos requisitos de compactación y calidad especificados para la capa subrasante. Para el caso de los pavimentos de concreto, en ocasiones resulta conveniente colocar una capa sub-base cuando las especificaciones para el concreto son más exigentes.

e) Base

Capa intermedia entre la capa de rodamiento y la capa sub-base. Generalmente se usa en los Pavimentos flexibles y se compone de materiales pétreos con buena distribución granulométrica, esta capa permite reducir los espesores de carpeta ya que tiene una función estructural importante al reducir los esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas inferiores, proporcionando además una función drenante del agua atrapada dentro del cuerpo del pavimento.

f) Carpeta Superficie de rodamiento constituida por materiales endurecidos para disipar los esfuerzos hacia las terracerías. Se forma de materiales granulares con o sin liga o más comúnmente de concreto hidráulico en sus diferentes variantes.

g) Drenaje

Es un sistema para controlar el agua en las cercanías o sobre el pavimento o la terracería

h) Acción de “bombeo”

Acción debida a la expulsión del agua que se acumula bajo la losa de pavimento por el efecto de las cargas rodantes. Al ser expulsada por las juntas o las grietas del pavimento el agua arrastra partículas de la base, deteriorándola.

i) Límite líquido, *LL*

El límite líquido se define como el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico.

j) Límite plástico, *LP*

Es el contenido de humedad, expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico.

k) Plasticidad

Es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse.

l) Índice plástico

Es la diferencia de valores absolutos entre el mayor y el menor contenido de agua entre los límites líquido y plástico. $LL - LP$.

m) Valor relativo de Soporte, *VRS*

Es el índice de resistencia al esfuerzo cortante en determinadas condiciones de compactación y humedad.

n) Permeabilidad (k)

La facilidad con que el agua circula a través del suelo. Se expresa en términos de velocidad de flujo de acuerdo con la Ley de Darcy para flujo laminar.

o) Confiabilidad

Probabilidad de que el sistema de pavimento se comporte de manera satisfactoria durante toda su vida de proyecto bajo las solicitaciones de carga e intemperismo.

Relación de normas y especificaciones

En el desarrollo de los trabajos deberá cumplirse con las fracciones aplicables del MOC-CFE-93, las Normas Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, vigentes, así como las siguientes normas de Petróleos Mexicanos:

- Exploración y muestreo de suelos para cimentaciones de obra civil, partes I y II
- Pruebas índice.
- Manual de Mecánica de Suelos de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Enseguida se enlistan las normas aplicables a los ensayos a realizar:

Ensayo Norma a aplicar

Identificación visual y al tacto NMX-C-416-ONNCCE-2003

Contenido de agua en materiales térreos NMX-C-416-ONNCCE-2003

Límite Líquido, plástico e índice de plasticidad NMX-C-416-ONNCCE-2003

Análisis granulométrico por mallas NMX-C-416-ONNCCE-2003

Determinación de la masa específica NMX-C-416-ONNCCE-2003

Resistencia al corte no drenada con cronometro ASTM-D 4648-00

Compresión simple (no drenada) ASTM-D 2166-00

Compresión triaxial de deformación controlada ASTM-D 4767-02

ASTM-D 2850-03

Prueba de consolidación unidimensional ASTM-D 2435-03

Así mismo, será necesario que los bancos de materiales se analicen y clasifiquen de acuerdo con la norma No. 3.123.01 “Bases Sub-bases y revestimientos” de Petróleos Mexicanos.

Para la clasificación de materiales para efecto de pago en excavaciones la norma a utilizar será la 3.12.08 “Clasificación de materiales para pago de excavaciones.”.

Por ultimo, la norma a seguir para la elaboración de los planos y documentos de ingeniería será la P.1.0000.06 “Estructuración de planos y documentos de ingeniería”.

GLOSARIO

Aceite Terciario: Crudo en yacimientos que se caracterizan por su bajo contenido de hidrocarburos, baja permeabilidad y baja presión, por lo que la productividad de los pozos es reducida.

Gas Seco: compuesto formado esencialmente por metano (94-99)%

Gas Húmedo Amargo: Mezcla de Hidrocarburos obtenida del proceso de gas natural en el que se eliminan impurezas este se caracteriza por tener gasolinas y gas L.P.

Gas Húmedo Dulce: Mezcla de Hidrocarburos obtenida del proceso de gas natural en el que se eliminan impurezas este se caracteriza por tener compuestos corrosivos de azufre

Planta Criogénica: Una planta criogénica es un complejo industrial que hace uso de procesos criogénicos, es decir, de procesos de enfriamiento a muy bajas temperaturas para conseguir objetivos determinados (separar gas natural de líquidos, licuar)

Pila: columna de cimentación de diámetros mayores a 60cm

MMPCD: Millones de Pies Cúbicos Diarios

Down-Hole : fundamentalmente sirve para detectar la velocidad de propagación de las ondas tangenciales SH (vibración de las partículas en la dirección horizontal) en su trayectoria vertical a través de una masa de suelo.

Compacidad del manto grado de acomodo alcanzado por las partículas de suelo, dejando más o menos vacíos entre ellas En un suelo muy compacto, las partículas sólidas que lo constituyen tienen un alto grado de acomodo y la capacidad de deformación bajo carga del conjunto será pequeña.

Angulo de fricción interna Relación entre la cohesión, la fricción interna y la geometría de fallamiento

Nivel freático lugar en el que se encuentra el agua subterránea. En éste nivel la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica.

Grado de compactación, nivel permisible se compactación de las partículas de un suelo

Peso volumétrico seco cantidad de espacio que un paquete ocupa en relación con su peso real

Contenido de humedad Cantidad de agua comprendida en los suelos.

Capacidad de cargas nivel de población que puede soportar un medio ambiente dado sin sufrir un impacto negativo significativo

Estados límites de servicio, Cuando una estructura o elemento estructural se convierte en inadecuada para su uso, se dice que ha alcanzado su estado límite

Estados límites de falla Cuando una estructura o elemento estructural se convierte en inadecuada para su uso, se dice que ha alcanzado su estado límite y puede colapsar.

Límite plástico. Es el contenido de humedad considerar el suelo como material no plástico.

Límite líquido. Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

Límite de saturación. Es el contenido de humedad que el suelo tiene todo el volumen lleno de ag Sin embargo para nuestro estudio solo consideramos los cuatro últimos por que son ampliamente utilizados.

Porcentaje de finos. Forma de expresar las fracciones del tipo de suelo

Densidad de sólidos. Se define la densidad como el cociente entre la masa y el volumen de un cuerpo.

Compresión simple. Carga axial es decir en un solo sentido

Compresión triaxial carga generada por los tres planos

Consolidación Se denomina consolidación de un suelo a un proceso de reducción de volumen de los suelos finos cohesivos (arcillas y limos plásticos),

Fuste Parte cilíndrica de la columna sobre la que se apoya la base

Manta de cielo: Tela casi transparente, muy ligera y suave

Ademes: Cubierta de madera con que se aseguran las pilas

Traspaleos: Tipo de señalamientos

Vehículo crítico: T3 – S2 Camión con tres ejes y caja trasera con e ejes mas

Modulo de elasticidad Es la relación del esfuerzo a la deformación en los materiales bajo determinadas condiciones de carga

VRS El valor relativo de soporte es la relación de las resistencias en porcentaje de material en estudio y de un material estándar a ser penetrados por un cilindro metálico de 19.35cm^2 el material estándar es una caliza triturada, para la cual ya se tienen las resistencias en una gráfica.