



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPIEDADES DINAMICAS DE DEPOSITOS
MARINOS PARA EL DISEÑO DE
PLATAFORMAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JOSE MARIA REYES MARIANO

ASESOR:

DR. VÍCTOR MANUEL TABOADA URTUZUASTEGUI



MÉXICO, D.F.

2005

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Juan Francisco Martínez Maldonado, María Teresa Mariano López.

Gracias por su confianza y amor que me brindan sin esperar nada a cambio.

A Nohemí:

Por todo su apoyo a lo largo de este tiempo.

PROPIEDADES DINÁMICAS DE DEPÓSITOS MARINOS PARA EL DISEÑO DE PLATAFORMAS

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

- Antecedentes
- Objetivos
- Alcances
- Contenido de la tesis

CAPÍTULOS

1 COMPLEJOS PETROLEROS

- 1.1 Importancia de los hidrocarburos
- 1.2 Complejos petroleros en la Sonda de Campeche
- 1.3 Geología de la Sonda de Campeche
- 1.4 Propiedades geotécnicas de la Sonda de Campeche
 - 1.4.1 Estratigrafía general
 - 1.4.2 Propiedades índice y mecánicas de la Sonda de Campeche
- 1.5 Sismicidad de la Sonda de Campeche
 - 1.5.1 Placas tectónicas en México
 - 1.5.2 Zonificación geosísmica de México
 - 1.5.3 Servicio sismológico nacional
 - 1.5.4 Base mexicana de datos de sismos en México
 - 1.5.5 Fallas geológicas en la Sonda de Campeche

2 TIPOS DE PLATAFORMAS MARINAS

- 2.1 Plataforma de perforación
- 2.2 Plataforma de producción
- 2.3 Plataforma de enlace
- 2.4 Plataforma habitacional
- 2.5 Plataforma de rebombeo
- 2.6 Plataforma de almacenamiento de diesel
- 2.7 Plataforma de compresión de gas
- 2.8 Componentes de la estructura
- 2.9 Instalación de la estructura
- 2.10 Cimentación de plataformas

3 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS

- 3.1 Tipos de ondas sísmicas
- 3.2 Propiedades dinámicas más importantes
 - 3.2.1 Módulo de rigidez al esfuerzo cortante G
 - 3.2.2 Modelación numérica de la relación $G-\gamma$
 - 3.2.3 Relación de amortiguamiento histerético, λ
 - 3.2.4 Modelación numérica de la relación $\lambda-\gamma$

- 3.3 Parámetros que afecta las propiedades dinámicas de las arcillas
 - 3.3.1 Efecto del nivel de deformación angular
 - 3.3.2 Efecto del esfuerzo efectivo octaédrico y tipo de consolidación
 - 3.3.3 Efecto de la relación de vacíos
 - 3.3.4 Efecto del grado de preconsolidación
 - 3.3.5 Efecto de la edad geológica
 - 3.3.6 Efecto del número de ciclos
- 3.4 Equipo de laboratorio dinámico
 - 3.4.1 Columna resonante
 - 3.4.2 Triaxial cíclica

4. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL COMPLEJO KU-MALOOB-ZAAP

- 4.1 Estratigrafía del sitio
- 4.2 Exploración geotécnica
- 4.3 Imágenes de rayos X de las muestras de tubo Shelby
- 4.4 Módulo de rigidez a pequeñas deformaciones
- 4.5 Módulo de rigidez a grandes deformaciones
- 4.6 Módulo de rigidez a pequeñas y grandes deformaciones
- 4.7 Relación de amortiguamiento a pequeñas deformaciones
- 4.8 Relación de amortiguamiento a grandes deformaciones
- 4.9 Relación de amortiguamiento a pequeñas y grandes deformaciones
- 4.10 Parámetros más importantes
 - 4.10.1 Efecto de σ' en G
 - 4.10.2 Efecto de σ' en λ
 - 4.10.3 Efecto del I_p en el módulo de G
 - 4.10.4 Efecto del I_p en la relación de amortiguamiento, λ
 - 4.10.5 Efecto del número de ciclos en el módulo G
- 4.11 Modelación numérica de la variación de G y λ con la deformación angular
- 4.12 Determinación de los parámetros γ_r , A y B
- 4.13 Ajuste del modelo de *Davidenkov* a los resultados experimentales
- 4.14 Características de los suelos de complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCION

ANTECEDENTES

La Sonda de Campeche se encuentra ubicada al sureste de México, dentro de la plataforma continental del Golfo de México, en una franja que comprende las isobatas de 20 a 200 m de profundidad que queda totalmente incluida dentro de las aguas territoriales nacionales frente a las costas de Campeche y Yucatán, aproximadamente a 80 kilómetros de la costa.

Se han realizado trabajos referentes a los suelos marinos en la Sonda de Campeche para conocer los parámetros sísmicos y de oleaje, desde que se encontró el primer complejo petrolero el cual se le conoce como CANTARELL, este complejo dió margen a investigar y conocer las características de los suelos marinos en la Sonda de Campeche para la colocación de plataformas marinas.

Es necesario realizar trabajos sobre los suelos marinos para la exploración así como la explotación de los pozos petroleros ya que poco a poco se fueron descubriendo por estudios geofísicos los complejos de EK-BALAM, el complejo más reciente que es el KU-MALOOB-ZAAP, del cual se realizaron los análisis que se presentan en este trabajo, esta información se ha realizado en gran medida por diferentes organismos como PEMEX (petróleos mexicanos), el Instituto Mexicano del Petróleo y el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

OBJETIVO

Conocer las propiedades dinámicas de los suelos marinos de la Sonda de Campeche y en particular del complejo KU-MALOOB-ZAAP para la instalación de plataformas marinas; como se menciona en los antecedentes se han hecho algunos estudios pero dicha información no es del dominio público, con este trabajo se pretende dar a conocer los estudios en lo referente a las características dinámicas de los suelos marinos de la Sonda de Campeche en una sola publicación, por lo que interesados sobre el tema encuentren un antecedente general referente a la Sonda de Campeche.

Se presentan dos tipos de pruebas de laboratorio como son la columna resonante y triaxial cíclica para conocer las propiedades dinámicas de los suelos marinos en la Sonda de Campeche para pequeñas y grandes deformaciones, para conocer el comportamiento de las arcillas marinas en la Sonda de Campeche.

Conociendo los resultados del laboratorio se realiza un comparativo con el modelo de *Davidenkov*, de tal manera de comparar las tendencias de las curvas obtenidas del laboratorio con las teóricas.

INTRODUCCIÓN

ALCANCES

La Sonda de Campeche es el mayor productor de hidrocarburos a nivel nacional, se presentan los diferentes complejos petroleros, su influencia dentro de la región, los diferentes tipos de plataformas con que cuenta la Sonda de Campeche.

La Realización de las propiedades dinámicas de los suelos marinos en la Sonda de Campeche, el equipo de laboratorio que se utiliza para conocer las propiedades dinámicas, determinar los parámetros dinámicos: módulo de rigidez y amortiguamiento del suelo marino, mediante pruebas de columna resonante y triaxial cíclica; las pruebas pertenecen al complejo KU-MALOOB-ZAAP el cual se encuentra en la Sonda de Campeche y por su importancia de explotación ocupa el tercer lugar a nivel nacional en la extracción de petróleo y gas natural.

CONTENIDO DE LA TESIS

En el capítulo uno se presentan diferentes complejos petroleros que existen en la Sonda de Campeche, para tener un panorama de la importancia del petróleo a nivel nacional.

El capítulo dos toca el tema de las diferentes plataformas marinas con que cuenta la Sonda de Campeche, de cómo se componen y el proceso de instalación de la estructura.

El capítulo tres se describen las propiedades dinámicas de los suelos y el equipo de laboratorio que se utiliza para conocer estos parámetros dinámicos de los suelos.

En el capítulo cuatro se dan características generales del complejo petrolero KU-MALOOB-ZAAP, así como los parámetros de módulo de rigidez y relación de amortiguamiento, además de la utilización de imágenes de rayos X para la extracción de especímenes para realizara las pruebas dinámicas de tubos Shelby.

En el capítulo cinco se dan las conclusiones de este trabajo referente a las propiedades de los suelos marinos en la Sonda de Campeche y en particular del complejo KU-MALOOB-ZAAP.

1 COMPLEJOS PETROLEROS

1.1 IMPORTANCIA DE LOS HIDROCARBUROS

El petróleo empezó a utilizarse comercialmente a mediados del siglo XIX como lubricante y materia prima para alumbrado hasta el fin de la Primera Guerra Mundial. En ese entonces, los principales centros de producción se encontraban en RUSIA y los ESTADOS UNIDOS, aunque ya empezaba a desarrollarse la producción en el Medio Oriente. La expansión favoreció el surgimiento de la producción de los hidrocarburos, con lo que empezó su carrera hacia la condición de principal fuente de energía primaria. Después de la Segunda Guerra Mundial completó sus aplicaciones para la industria petroquímica.

En México, de acuerdo con el Balance Nacional de Energía **1998**, los hidrocarburos se ubican en primer lugar con el 90 por ciento en la estructura de participación de las diferentes fuentes de energía en total de la producción nacional del país.

Los combustibles fósiles (hidrocarburos y carbón) son y seguirán siendo la principal fuente de energía, como consecuencia de su menor costo y mayor eficiencia en su transformación. Sin embargo, el impacto ambiental por la emisión de gases que ocasionan el efecto invernadero, como consecuencia de su combustión, puede limitar la utilización en el futuro. Por tal razón el gas natural ha comenzado a ser el combustible predilecto para generar electricidad, básicamente en las plantas de ciclo combinado, cuya construcción es menos costosa y su operación más eficiente.

A finales de esta primera década del tercer milenio, se estima que el gas natural se mueva del tercer al segundo lugar en importancia en la estructura global de consumo de energía primaria después del petróleo, ya que se estima un crecimiento promedio anual de su demanda mundial de 3.3 por ciento.

En sí, el gas natural desempeña un papel estratégico en el consumo de energéticos para los próximos años, ya que está considerado como un elemento fundamental en la modernización del sector de energía y del país.

Desde 1938, año en que la nación asumió plenamente sus derechos sobre la industria petrolera mexicana, se ha trabajado incansablemente para hacer de PEMEX (petróleos mexicanos) la empresa más relevante del país y una de las diez más grandes del mundo. México ocupó el octavo lugar en el año 2000 como productor de crudo y el noveno en producción de gas. Así mismo, en términos de reservas ocupa el noveno lugar al primero de enero de 2001, mientras que en capacidad de refinación ocupamos la 14ª posición.

La Región Marina Noroeste especializada en operaciones costa afuera, está involucrada en todos y cada uno de los aspectos del negocio de la exploración y explotación de hidrocarburos, el cual inicia con la localización y desarrollo de yacimientos, continua con la extracción, procesamiento y comercialización del crudo y el gas natural.

La Región Marina Noroeste tiene bajo su jurisdicción, llevar a cabo las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos que se localizan en el Sureste del país en la plataforma y el talud continental del Golfo de México. Comprende una superficie de 166 mil km² que rodea la Península de Yucatán y está limitada por el estado de Campeche en el Sur, por la Región Marina Suroeste en las direcciones Norte y Oeste, y por las líneas limítrofes de aguas territoriales en el Este.

Destaca en el contexto nacional por tener bajo su responsabilidad la explotación del 34 por ciento de las reservas totales de crudo y el 10 por ciento de las reservas totales de gas natural. En cuanto a la producción nacional de hidrocarburos aporta el 66 por ciento del crudo (la mayor parte es de tipo Maya) y el 17 por ciento del gas natural. Desde el inicio de su explotación al primero de enero de 2001, la Región Marina Noroeste, ha producido el 35 por ciento del crudo nacional y el nueve por ciento de gas natural en el país.

1.2 COMPLEJOS PETROLEROS EN LA SONDA DE CAMPECHE

A finales de los años setenta, se descubrieron los yacimientos más importantes en las tres regiones que conforman nuestro sistema petrolero y que ubicaron a México como un país de gran capacidad en la producción de hidrocarburos a nivel mundial. Desde 1979, las reservas probadas de la Sonda de Campeche se han convertido en el patrimonio más importante para el país en materia de recursos energéticos no renovables, contribuyendo con volúmenes que han representado un 46 por ciento de las reservas totales del país.

A finales de 1992, México contaba con una reserva probada de 65,050 millones de barriles de crudo equivalente, que lo situaron entre los primeros ocho países productores de aceite crudo.

La Sonda de Campeche es el área donde se localizan sus principales yacimientos, abarca una superficie aproximada de 15,000 km² y esta ubicada en la plataforma continental del Golfo de México, a una distancia promedio de 80 km de la costa, frente a los estados de Tabasco y Campeche.

La explotación de los yacimientos de la Región Marina se inició en junio de 1979 con el pozo CANTARELL 1-A fig 1.1, cuyo intervalo productor se encontró a una profundidad de 1,500 m. A finales de ese año, ya se contaba con seis pozos productores del mismo complejo, los cuales eran explotados a un ritmo promedio de 40 mil barriles por día de aceite crudo.

Durante 1980 se intensificó la explotación en la Región Marina, ya que al término de ese año el nivel de extracción alcanzó la cifra de 770 mil barriles por día de crudo, que eran aportados por 35 pozos del complejo CANTARELL y uno del campo ABKATÚN, cuya producción inició en septiembre de ese mismo año.

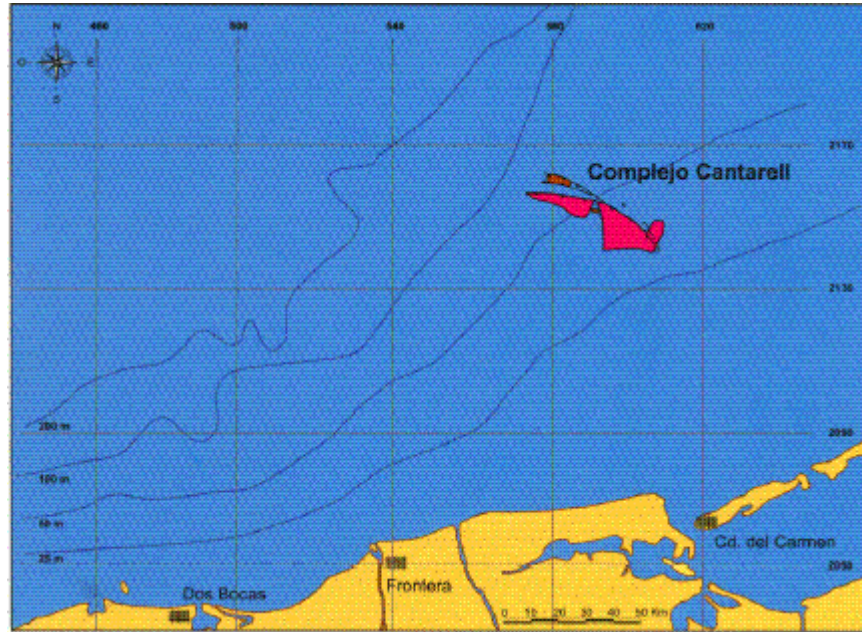


Fig 1.1 El complejo Cantarell se localiza al noroeste de Ciudad del Carmen, a una distancia aproximada de 75 Kilómetros (PEMEX, 1999)

El ritmo de explotación continuó a la alza en los dos años siguientes, consolidándose la Sonda de Campeche como la principal zona productora del país en diciembre de 1982, cuando alcanzó una producción de 1963 mil barriles por día, mediante la explotación de 83 pozos que pertenecían a los campos CANTARELL, KU, ABKATÚN, POL y CHUC.

En promedio la producción en la Sonda de Campeche se mantuvo en un nivel de explotación que fluctuó alrededor de 1.7 mil millones de barriles por día (MMBD) de crudo hasta 1990, sin embargo en 1996 se redujo a su nivel más bajo, cuando el precio del crudo también llegó a su valor más deprimido: 10 dólares por barril.

El gas producido en la Sonda de Campeche proviene de una fase gaseosa que se encuentra disuelta en el crudo, a las condiciones de presión y temperatura del subsuelo donde se encuentran los yacimientos petroleros. Al moverse el crudo hacia la superficie, a través de los pozos donde la presión y la temperatura cambian, el gas se libera, formándose una mezcla de líquido y gas, la cual se separa en cada una de sus fases en la superficie mediante un equipo especial.

El volumen de gas asociado al crudo pesado es del orden de los 450 pies cúbicos de gas por barril de aceite, mientras que en el caso del crudo ligero se sitúa en un promedio de 850 pies cúbicos por barril. En consecuencia, la oferta de gas en la Sonda de Campeche ha crecido a medida de lo acontecido con los volúmenes de crudo. Aun cuando resulta evidente, a partir de los datos anteriores, debe resaltarse la excepcional capacidad de producción por pozo en la Sonda de Campeche, que llegó a ser del orden de los 50 MBD de crudo en los inicios de la explotación de algunos pozos, como fue el caso de los de CANTARELL 3, 68 y 74, sobresalen los campos más antiguos, como son: ABKATUN,

POL, CHUC, CANTARELL y KU. En la fig 1.2 se presenta la distribución de pozos por activo en la Sonda de Campeche por complejos.



Fig 1.2 Pozos en la Sonda de Campeche (PEMEX, 2001)

El complejo CANTARELL se localiza frente a las costas de Tabasco y Campeche, con tirantes de agua entre 35 y 50 metros, aproximadamente a 75 kilómetros al Noroeste de Ciudad del Carmen, Campeche. Está constituido por los campos Akal, Nohoch, Chac, Kutz y Sihil, ubicados en lo que se conoce geológicamente como la cuenca de Campeche.

Los yacimientos del complejo CANTARELL se encuentran en trampas de tipo estructural y con tirantes impregnados de hidrocarburos, con espesores netos de hasta 900 metros. La densidad del aceite de estos yacimientos varían de 19 a 31 grados API. La estructura es un gran anticlinal con orientación NW-SE, cuya configuración actual es resultado del rompimiento e interacción de las placas tectónicas en el litoral del pacifico, por lo que el complejo CANTARELL esta integrado por varios campos limitados por fallas.

En nuestro país, CANTARELL es el activo más importante por su gran volumen de reservas y sus altos ritmos de producción que llegaron a ser del orden de 40 MBD por pozo al inicio de su explotación. Es un yacimiento catalogado como gigante, en relación a su reserva probada original.

El complejo EK-BALAM se encuentra localizado a 95 kilómetros al Noroeste de Ciudad del Carmen, Campeche, delimitado en la porción W-NW por los activos CANTARELL y KU-MALOOB-ZAAP, quedando ilimitadas las porciones NE, E y SE, por

lo que la expectativa de incorporar prospectos exploratorios es considerable, ya que su área geográfica de influencia esta considerada como la de mejores perspectivas exploratorias.

Los campos que integran el activo EK-BALAM son: Ek, Balam, Ixtoc (fig 1.3), Lum y Bacam.

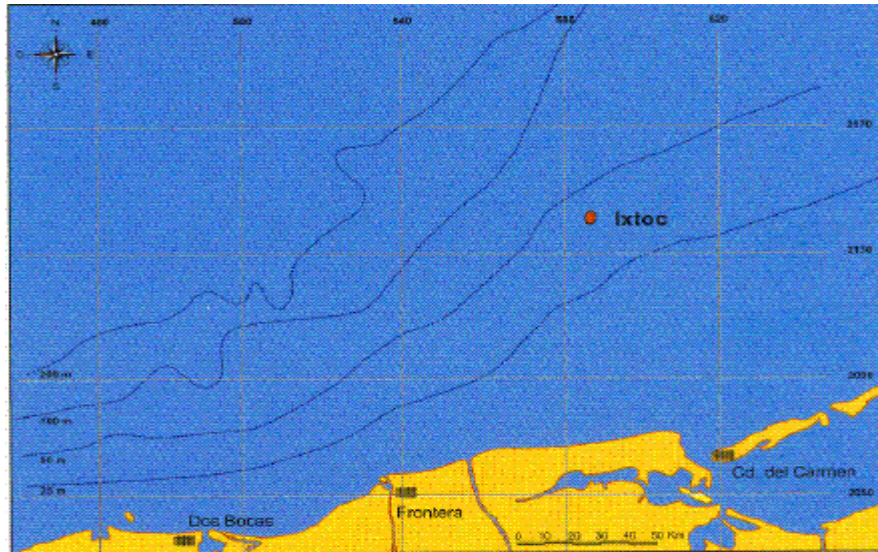


Fig 1.3 Localización del campo Ixtoc. Se ubica a 92 kilómetros al noroeste de Ciudad del Carmen, Campeche. Las líneas punteadas se refieren al tirante de agua (PEMEX, 1999)

EK-BALAM se ha distinguido por el avance tecnológico utilizado en sus operaciones, ya que es el primer campo en México que cuenta en forma integral con el sistema artificial de producción denominado bombeo electrocentrífugo (BEC), el cual se ha venido utilizando exitosamente en los campos EK y BALAM desde 1995, fig 1.4.

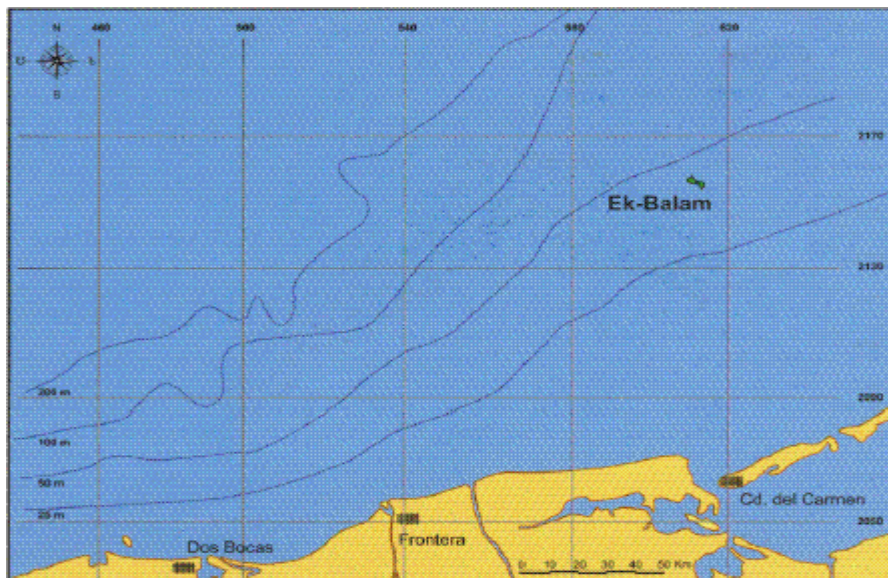


Fig 1.4 Los campos Ek y Balam se encuentran aproximadamente a 95 kilómetros al noroeste de Ciudad del Carmen, Campeche (PEMEX, 1999)

El complejo KU-MALOOB-ZAAP se localiza a 102 kilómetros de Ciudad del Carmen, este activo orienta sus proyectos estratégicos al aprovechamiento de su infraestructura, así como a la propuesta de nuevas oportunidades exploratorias. Es considerado uno de los activos más grandes del país, está compuesto por tres campos productores: Ku, Maloob y Zaap. Por su capacidad, representa el 12 por ciento de la producción regional, ya que genera más de 268 mil barriles por día de aceite pesado.

El centro de proceso KU-A esta localizado en la Sonda de Campeche a 90.8 km al NW de las costas de Ciudad del Carmen, Campeche y está integrado por tres plataformas: perforación, producción y habitacional. Además se tienen tres puentes estructurales de interconexión, un quemador vertical y un quemador horizontal.

En la plataforma de perforación se tienen doce pozos en producción, una batería de separación con unidades de bombeo y otros elementos asociados; además, se recibe la producción de los pozos de las plataformas satélites, la plataforma de enlace recibe la producción de las plataformas satélites. Tiene instalada una batería de separación y bombeo, también elementos de sistemas de compresión del gas de proceso. El módulo habitacional cuenta con una capacidad de alojamiento para 199 personas, consta de tres niveles con dormitorios, oficinas, consultorios médicos, comedor y cocina, sobre la cubierta inferior se localiza el área de servicios y la cubierta superior cuenta con un helipuerto de 37.0 m de largo por 18.48 m de ancho con capacidad para dos helicópteros.

Debido a la magnitud de las reservas de hidrocarburos, este complejo es considerado como el tercero más importante de la Republica Mexicana, actualmente el centro de procesos de Ku-A cuenta con siete plataformas periféricas y una red de ductos de 131.60 km, para la recolección y transporte de hidrocarburos. La separación de la capacidad de aceite es de 390 mil barriles por día y de 248 millones de pies cúbicos de gas por día.

El objetivo de este complejo de explotación es estabilizar el petróleo crudo tipo Maya que recibe de los yacimientos a profundidades que van de 2000 a 4000 m bajo el nivel del mar.

1.3 GEOLOGÍA DE LA SONDA DE CAMPECHE

Los suelos marinos de la Sonda de Campeche están constituidos por sedimentos recientes clásticos carbonatados y térreos. Existen también, accidentes geológicos como formaciones arrecifales, montículos carbonatados, paleocanales enterrados, fallas y fracturas. La localización de la Sonda de Campeche, se presenta en la fig 1.5.

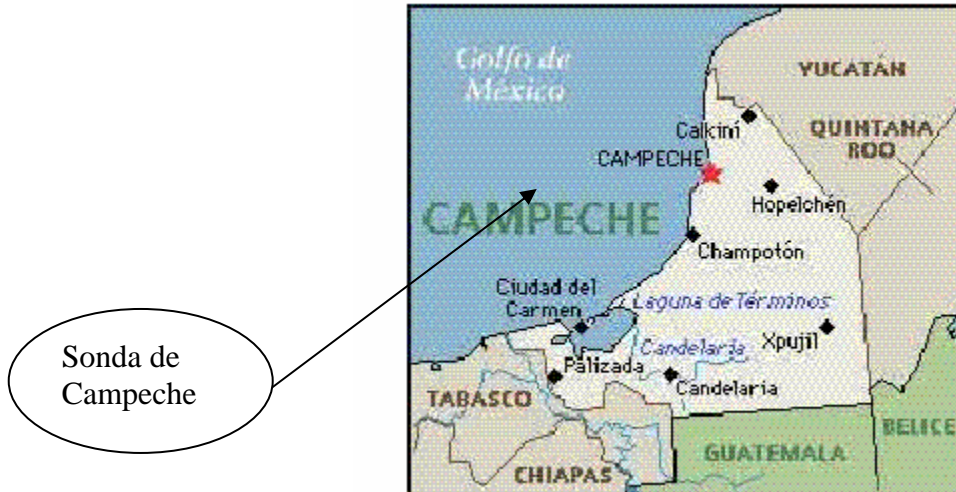


Fig 1.5 Localización de la Sonda de Campeche (PEMEX, 1985)

En el piso oceánico de la plataforma marina occidental de Yucatán se puede dividir con base en sus características litológicas en dos zonas una Norte y otra Sur, la zona Sur comprende la plataforma marina que se localiza frente a las costas que van desde la desembocadura del Río Grijalva, Punto Xicalango e Isla del Carmen, hasta la desembocadura del Río Champotón, es decir lo que se denomina propiamente la Sonda de Campeche. Esta zona tiene una amplitud máxima de 120 Km y una mínima de 36 Km, es de pendiente pronunciada y tiene una profundidad media de 40 m aproximadamente.

Los sedimentos de la zona Sur son los térreos; (fig 1.6) arcillas y limos de manera predominante, producto de los acarrees de los ríos Grijalva, Usumacinta, San Pedro y la desembocadura de la Laguna de Términos por sus abundantes corrientes fluviales.

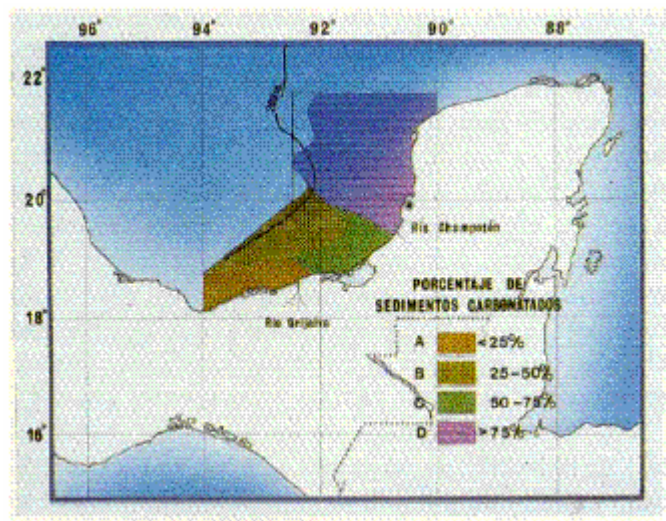


Fig 1.6 Distribución de carbonatos en los sedimentos recientes (PEMEX, 1985)

Los terrígenos se transportan y distribuyen sobre el piso marino acompañados con arena. Frente a la desembocadura del Río Grijalva, donde los movimientos del mar son turbulentos se tiene la depositación de arenas finas uniformes. Mar adentro el flujo se

comporta como laminar y de baja velocidad, permitiendo la depositación de los sedimentos del tamaño de la arcilla.

1.4 PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LA SONDA DE CAMPECHE

En general, en la superficie se tiene un estrato de arcilla blanda a muy blanda, de color gris, con fragmentos de concha, con un espesor que va de los 5 a los 25 m. Existen, sin embargo arenas; dichas áreas corresponden casi siempre a las desembocaduras de los ríos importantes de la zona y a superficies donde afloran formaciones coralinas o bien a zonas cercanas a la costa donde las aguas son someras. Un ejemplo de lo anterior es la costa que se localiza frente a Ciudad del Carmen, en donde los sedimentos superficiales están formados por una capa de arenas de aproximadamente 10 m de espesor que se encuentran por encima de suelos arcillosos de consistencia firme a dura.

Las características de la mayoría de los materiales encontrados superficialmente corresponden a arenas medias con alto contenido de carbonatos con granos angulosos y una buena distribución de tamaño, los lechos superficiales arcillosos que se encuentran mar adentro tienen un alto contenido de agua y una consistencia que varía de muy blanda a blanda. En la parte Norte de la Sonda de Campeche las arcillas están por encima de una arena carbonatada que va de fina a media, en la fig 1.7 se presenta la distribución litológica de los sedimentos de la sonda de Campeche.

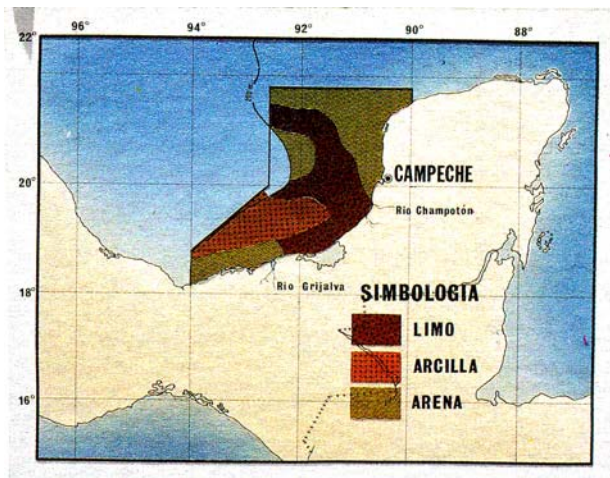


Fig 1.7 Distribución litológica de los sedimentos superficiales (PEMEX, 1985)

Los espesores más gruesos del estrato de arcillas superficiales se localiza en la parte Suroeste donde alcanza 25 m. Este estrato se va reduciendo hacia el Noroeste dando lugar a que la arena subyacente aparezca superficialmente hacia el borde de la plataforma continental.

1.4.1 ESTRATIGRAFÍA GENERAL

La columna estratigráfica que muestra la fig 1.8 es el resumen con información recabada en la Sonda de Campeche mediante perforaciones hasta el Jurásico, más allá de los 4000 m.

CLASIFICACION HISTORICA			C O L U M N A		ESTRATIFICACION	
ERA	PERIODO	EPOCA	SIMBOLO	LITOLOGIA	ESPESOR	ESPESOR EN MILLONES DE PIES
C E N O Z O I C I C O	CUATERNARIO	RECIENTE	[Symbol]	ARCILLAS	650	1
				ARCILLAS ARCILLAS DE CORAL S. LENTIFICADO S. VENTILADO		
	TERTIARIO	MIOCENO	[Symbol]	ARCILLAS	2150	20
				LUTITAS		
				ARCILLAS		
				ARCILLAS		
	EOLIOGENO	[Symbol]	[Symbol]	LUTITAS	350	45
				EDGENO		
				PLEISTOCENO		
	MESOZOICO	CRETACICO	[Symbol]	[Symbol]	DOLOMITAS	500
ARCILLAS						
JURASICO		[Symbol]	[Symbol]	DOLOMITAS CALIZAS LIMELITAS	400	45
				LUTITAS ARCILLAS ARCILLAS PEREGRINOS		

Fig 1.8 Columna geológica de la Sonda de Campeche (PEMEX, 1985)

1.4.2 PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LA SONDA DE CAMPECHE

Las arcillas de la Sonda de Campeche se pueden interpretar dentro del marco conceptual de la teoría del estado crítico, al relacionar el estado crítico con las propiedades índice, pruebas triaxiales tipo (UU) y de consolidación unidimensional en función del esfuerzo de consolidación efectivo, ya que algunas arcillas tienen falla de tipo frágil y otras de tipo dúctil, ambas con deformaciones del 10% en la falla.

1.5 SISMICIDAD DE LA SONDA DE CAMPECHE

Hay tres fallas geológicas que van a través del estado de Veracruz y en el Golfo de México al Norte de Coatzacoalcos, estas fallas son: falla de Zacaboxo y de Clarion, ese funcionamiento está en dirección al Istmo de Tehuantepec que cruza Veracruz en la Dirección S-N. Los epicentros de los terremotos más importantes de esta región se han generado en esta falla, (SSM, 1976).

En el boquete de Tehuantepec: 94° a 95.2°O. Es uno de los dos segmentos a lo largo del margen mexicano que se distinguen actualmente. Este boquete es coincidente con la intersección del canto de Tehuantepec con la fosa media de América, y está cerca de la ensambladura triple entre la Norteamericana, la de Cocos y las placas del Caribe, actualmente no existen datos con los cuales predecir el peligro de un sismo.

1.5.1 PLACAS TECTÓNICAS EN MÉXICO

El análisis se basa en los catálogos del Instituto de Geofísica de la UNAM y en la información del Servicio Sismológico Nacional. Enumeran magnitudes y coordenadas del foco, para los acontecimientos entre 1806 y 1899 tales valores se deducen del área en la cual los choques eran mayores, de 1899 a 1987, la información tiene base instrumental. Los terremotos mexicanos se han dividido en cuatro grupos (Rosenblueth, 1989).

- 1 terremotos locales
- 2 terremotos continentales de placas
- 3 terremotos de profundidad intermedia
- 4 terremotos de subducción

1 Terremotos locales. En la placa norteamericana (Placa de Norteamérica), debajo del valle de México y de hecho a lo largo de la correa volcánica mexicana del transporte, existen varios sistemas de averías geológicas. Los sistemas principales son: averías esencialmente que funcionan en NE, averías con la orientación del SE y averías en la dirección SE. La magnitud máxima registrada en el siglo XX es $M_L = 5.1$.

2 Terremotos continentales de placas. En el resto de la placa Norteamericana el resbalón de falla geosísmica es originada esencialmente por dos fenómenos, el primero es por dislocación de esta con respecto a las placas oceánicas, debido a la fricción y empuje de las corrientes magnéticas de convección, y el segundo se debe a la flexión inducida por la fricción de las placas oceánicas. El sitio más peligroso del sismo es el extremo Este, ya que se encuentran un par de fallas que definen el Acambay. El sismo $M_W=7.0$ que ocurrió allí en 1912 y que en dicho sitio no se han producido choques significativos desde entonces.

3 Terremotos de profundidad intermedia. Magnitud registrada de terremotos de interplacas en la disminución de la placa de Cocos con la distancia de la zona de subducción (línea de triángulos abiertos fig 1.9. Esto se puede explicar en términos de las tensiones inducidas por la gravedad y por la fricción causada por las corrientes de convección. Dado la profundidad de la placa de cocos debajo del valle de México, el terremoto más peligroso de este grupo tiene $M_W = 6.5$ y una profundidad de 80 kilómetros.



Fig 1.9 Placas tectónicas que originan la sismicidad en México (Sing, y Ordaz, 1990)

4 Terremotos de subducción. Estos terremotos han generado históricamente las consecuencias más severas de México. La magnitud máxima registrada desde 1800 es de $M_S = 8.4$. Un análisis de las zonas que pueden deslizarse en un solo acontecimiento demuestra que el choque más violento puede ocurrir en el boquete sísmico de Guerrero, al Oeste de Acapulco, generando un sismo de $M_W = 8.2$.

La zona mexicana de subducción se extiende a lo largo de México occidental entre 92° y 106° W, define la zona de interacción entre las placas de Cocos, Rivera y las placas Norteamericanas (LeFevre y McNally, 1985) con una dirección $N 30^\circ E$.

1.5.2 ZONIFICACIÓN GEOSISMICA DE MÉXICO

El mapa Geosismico de México que se tiene actualmente, es para estimar los movimientos sísmicos en un sitio específico, cuando un estudio de detalle del sitio no está disponible, se ilustra en la fig 1.10 (Esteva y Ordaz, 1989; CFE, 1993). La escala de la intensidad de los movimientos sísmicos varía de A (el más bajo) a D (el más severo). Junto con la regionalización de la figura, hay una clasificación según el depósito del suelo que considera tres categorías. De acuerdo con el período natural del depósito T, son como sigue:

- a) tipo de suelo I: $T \leq 0.15$ seg
- b) tipo de suelo II: $0.15 \text{ seg} < T \leq 0.8$ seg
- c) tipo de suelo III: $T > 0.8$ seg

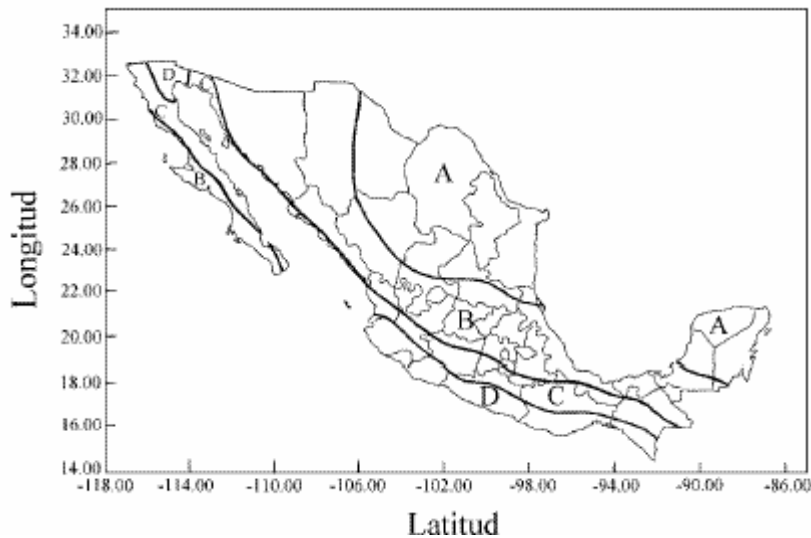


Fig 1.10 Regionalización sísmica de la Republica Mexicana (CFE, 1993)

Los espectros de diseño propuestos para las cuatro zonas sísmicas y los tres tipos de suelo se definen con la expresión siguiente:

$$S_a := a_o + \frac{c - a_o}{T_a} T \quad \text{para} \quad 0 \leq T \leq T_a$$

$$S_a := c \quad \text{para} \quad T_a \leq T \leq T_b$$

$$S_a := \left(\frac{T_b}{T} \right) \quad \text{para} \quad T_b \leq T$$

donde los valores de a_o , c , T_a , T_b y r se presentan en la tabla 1, S_a , es el coeficiente sísmico en decimales con respecto a la aceleración de la gravedad de la tierra para un amortiguamiento estructural del 5%. Estos espectros sísmicos de diseño adoptados para diversas zonas de México fueron determinados usando los catálogos de los terremotos mexicanos del siglo XX. La información de los catálogos fue combinada con esas regiones tectónicas similares para aumentar la base de datos. Los espectros de diseño fueron calculados para la combinación de todos los acontecimientos relevantes de una manera tal que, para cada sitio, el espectro fuera asociado a una expectativa fija del valor actual de las pérdidas.

Los valores consignados en esta tabla son para las estructuras del tipo B. Para los edificios del grupo A, los coeficientes sísmicos dados por la ecuación anteriores deben ser multiplicados por 1.5. Es decir, se aumenta los valores de S_a en un 50%.

Las estructuras tipo B son aquellas de uso común como edificios para vivir, oficinas, anuncio, zonas industriales, y los hoteles.

Tabla 1. Parámetros de espectro de diseño en México (CFE1993)

Zona Sísmica	tipo suelo	$a_o(g)$	$C(g)$	$T_a(sec)$	$T_b(sec)$	r
A	I	0.02	0.08	0.2	0.6	1/2
	II	0.04	0.16	0.3	1.5	2/3
	III	0.05	0.20	0.6	2.9	1
B	I	0.04	0.14	0.2	0.6	1/2
	II	0.08	0.30	0.3	1.5	2/3
	III	0.10	0.36	0.6	2.9	1
C	I	0.36	0.36	0.0	0.6	1/2
	II	0.64	0.64	0.0	1.4	2/3
	III	0.64	0.64	0.0	1.9	1
D	I	0.50	0.50	0.0	0.6	1/2
	II	0.86	0.86	0.0	1.2	2/3
	III	0.86	0.86	0.0	1.7	1

Edificios del tipo A: estructuras que la falla estructural podría causar la pérdida de una gran cantidad de gente o perdida económico. Edificaciones que tienen un riesgo importante por sostener explosivos o materia tóxica. También, instalaciones que el

funcionamiento es esencial durante una emergencia urbana, como: hospitales, escuelas, terminales de autobuses, estaciones de bomberos, plantas de energía eléctrica y telecomunicaciones; estadios, estructuras que almacenan sustancias inflamables y tóxicas; museos y edificios que almacenan los archivos y los expedientes públicos de importancia particular.

1.5.3 SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL

El Servicio Sismológico Nacional es orgullo de México. Fue inaugurado en 1910 y actualmente forma parte del Instituto de Geofísica de la UNAM.

El 5 de Septiembre de 1910, con asistencia del presidente de la Republica, General Porfirio Díaz, se inauguró solemnemente el Servicio Sismológico Nacional (SSN). De este modo, nuestro país fue uno de los primeros del mundo que tuvo un Instituto Sismológico, hoy el servicio Sismológico Nacional es de la Universidad Nacional Autónoma de México y forma parte del Instituto de Geofísica.

Su objetivo es registrar los sismos que se producen en la republica mexicana, catalogarlos según sus epicentros y magnitudes, calcular riesgos sísmicos futuros e informar al país de ello precisa y oportunamente.

Cuando se creó en 1910, dos meses antes del estallido de la revolución aún no existían los sismógrafos electromagnéticos. Todos los instrumentos instalados en la Estación Central de Tacubaya, eran mecánicos, estos instrumentos se colocaron en tres estructuras especiales, que tienen tres muros separados y metidos uno dentro del otro con el objeto de que los sismógrafos estuvieran aislados del clima y de las vibraciones.

El principio del sismógrafo es el mismo de 1910, un péndulo cuya inercia mueve un sistema de registros cuando el suelo tiembla, pero el sistema de registro es electromagnético y la amplificación de la señal es electrónica, mientras que la transmisión es digital. La única limitación para estos equipos es el ruido propio del suelo, que se verifica hasta en los sitios más quietos del mundo. Así, la Red del Servicio Sismológico Nacional puede detectar y localizar un sistema de magnitud superior a 3 en cualquier parte de la republica.

La información presentada en esta sección fue obtenida del servicio sismológico nacional (SSN) fig 1.11 muestra la distribución de terremotos en México de 1964 a 1995. Su magnitud es mayor de 4,5. Los puntos marrones representan los terremotos someros (profundidades menores de 50 kilómetros), y los puntos azules representan acontecimientos sísmicos con profundidades mayores de 50 kilómetros.

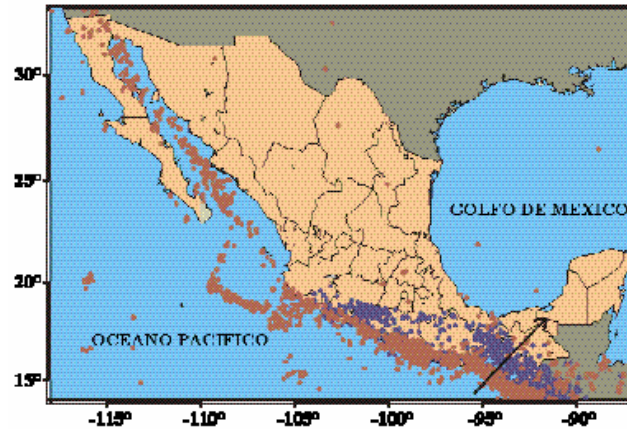


Fig 1.11 Sismos con $M \geq 4.5$ de 1964 a 1995 (SSN)

La distribución de sismos a lo largo del país, con magnitud mayor a 6.5 se representa en fig 1.12. Los colores en esta figura representan sismos someros y profundos.

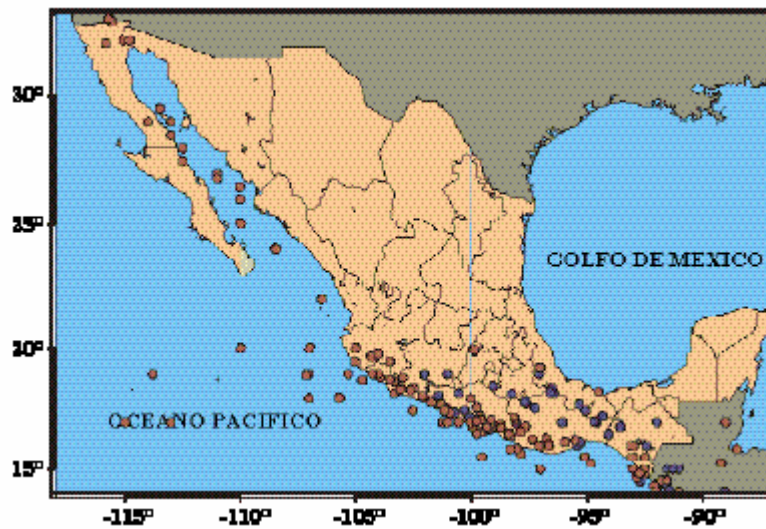


Fig 1.12 Sismos con $M \geq 6.5$ (SSN)

La fig 1.13 muestra con estrellas rojas sismos más importantes ocurridos en el siglo XX, el número junto con ellas (el año que sucedieron). Las estrellas de color azul representan los terremotos pequeños que excedieron raramente una magnitud de 6.0, (SSN).

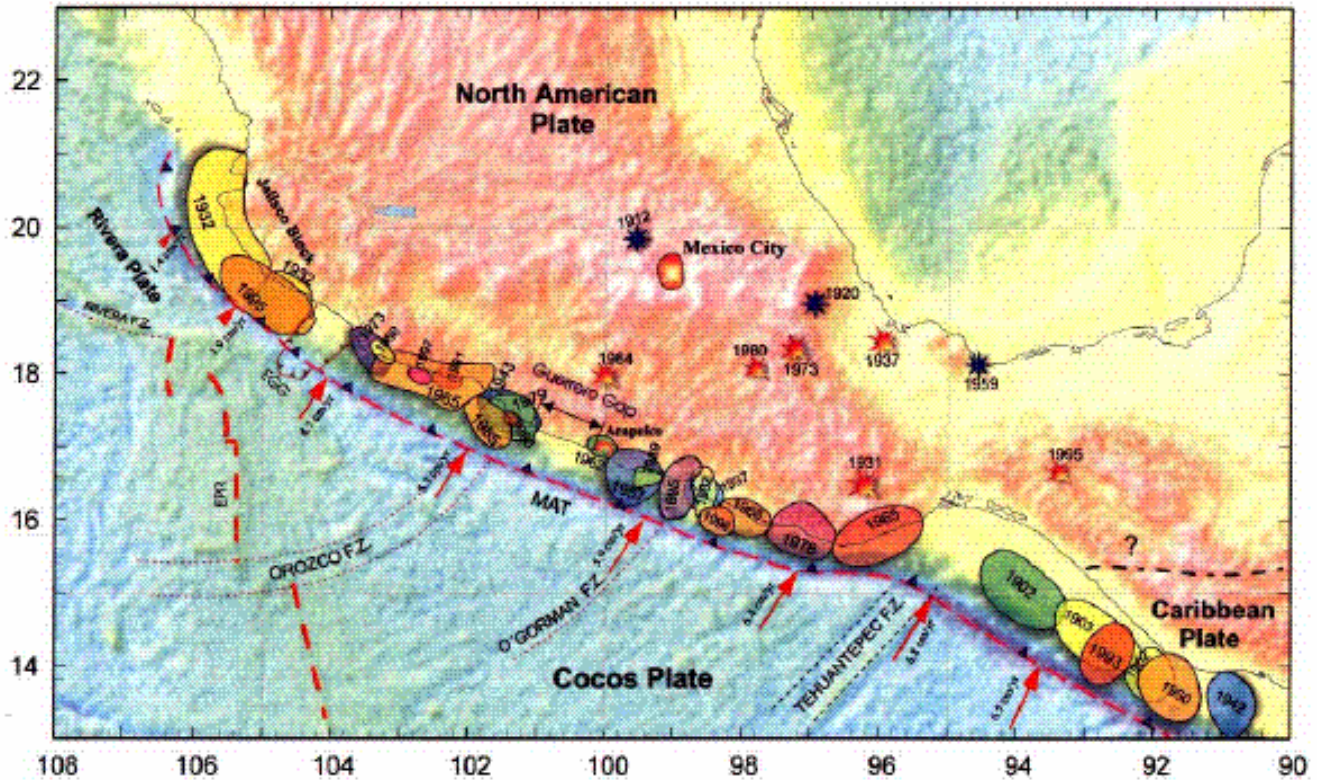


Fig 1.13 Los sismos mas importantes en el siglo XX (SSN)

1.5.4 BASE MEXICANA DE SISMOS FUERTES

Un catálogo de los terremotos que han afectado el valle de México a partir del siglo XIV a XX, (Fundación ICA, A. C. 1992). Hay también dos CD-ROMs que compilan en formato electrónico los terremotos registrados en México a partir de 1960 a 1999.

El primer CD-ROM describe la estructura de la base de datos de sismos fuertes y presenta en una forma condensada, la información completa sobre la instrumentación fuerte del movimiento y las grabaciones, así como la sismicidad asociada que se ha recolectado en México a partir de 1960 a 1995. También contiene 4659 acelerogramas registrados de 1992 a 1995, todo en un nuevo sistema estándar de búsqueda para facilitar al usuario el acceso a los datos por el terremoto, estación del acelerógrafo o el código del acelerograma. Los expedientes obtenidos por esta búsqueda se puede exhibir, imprimir o transferir a otro dispositivo de almacenaje (Alcántara, 1997).

El segundo CD-ROM de la base mexicana de sismos fuertes contiene la información recopilada de 1960 a 1999. Incluye la serie de tiempo de los 13,545 acelerogramas en una búsqueda estándar del formato A se proporciona para facilitar el acceso a los datos (SMIS, 2000). La distribución del epicentro de los terremotos ocurridos en el siglo XX se exhibe en la fig.1.14 (SMIS, 2000).

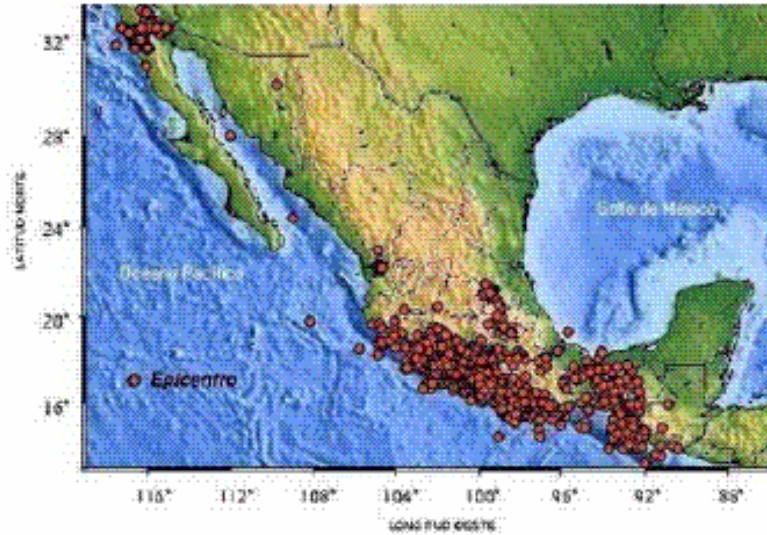


Fig 1.14 Registros de epicentros de sismos de 1960 a 1999 (SMIS,2000)

La distribución de las estaciones de registro se presentan en la (fig 1.15), donde se observa que la mayoría de los instrumentos se concentran en la costa del pacífico y muy pocos están situados a lo largo del golfo de México.

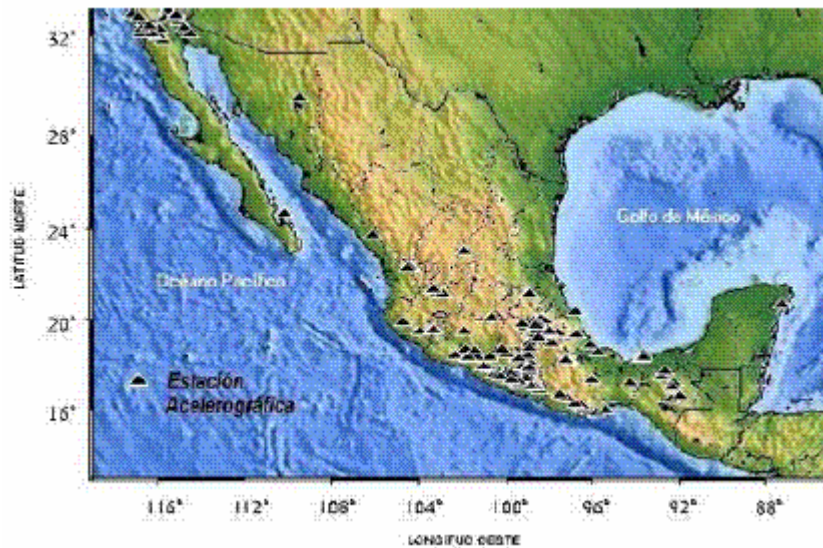


Fig 1.15 distribución de estaciones de registro en México (SMIS, 2000)

1.5.5 FALLAS GEOLÓGICAS EN LA SONDA DE CAMPECHE

La geología estructural de la Sonda se ubica en el marco geológico regional cuyos elementos tectónicos son principalmente la Plataforma de Yucatán y el Macizo de Chiapas, y en segundo término la Cuenca de Comalcalco y el Cinturón Calcáreo plegado de Reforma-Akal, fig 1.16.

La deformación de este último así como su sedimentación, son directamente dependientes al Norte por la plataforma de Yucatán y al Sur por el Macizo de Chiapas. La

plataforma de Yucatán está compuesta de rocas calcáreas mesozoicas y terciarias que parecen haber permanecido estables desde el Cretácico, su relieve actual es casi horizontal y se exhibe el fenómeno de erosión cárstica.

Las Cuencas Macuspana y Comalcalco están compuestas por gruesos apilamientos de sedimentos terciarios. Estas se separan del Cinturón Calcáreo de Reforma-Akal por sendas fallas normales contemporáneas a la sedimentación. La Cuenca de Macuspana es una fosa tectónica con una etapa de subsidencia durante el Mioceno, seguida del movimiento diastrófico de deformación. La de Comalcalco parece tener una tectónica menos compleja que la de Macuspana.

El Cinturón Calcáreo plegado tiene una tectónica muy compleja, tanto en su parte marina como en la continental; caracterizándose por fallas normales e inversas, discordancias angulares y plegamientos compresionales pronunciados.

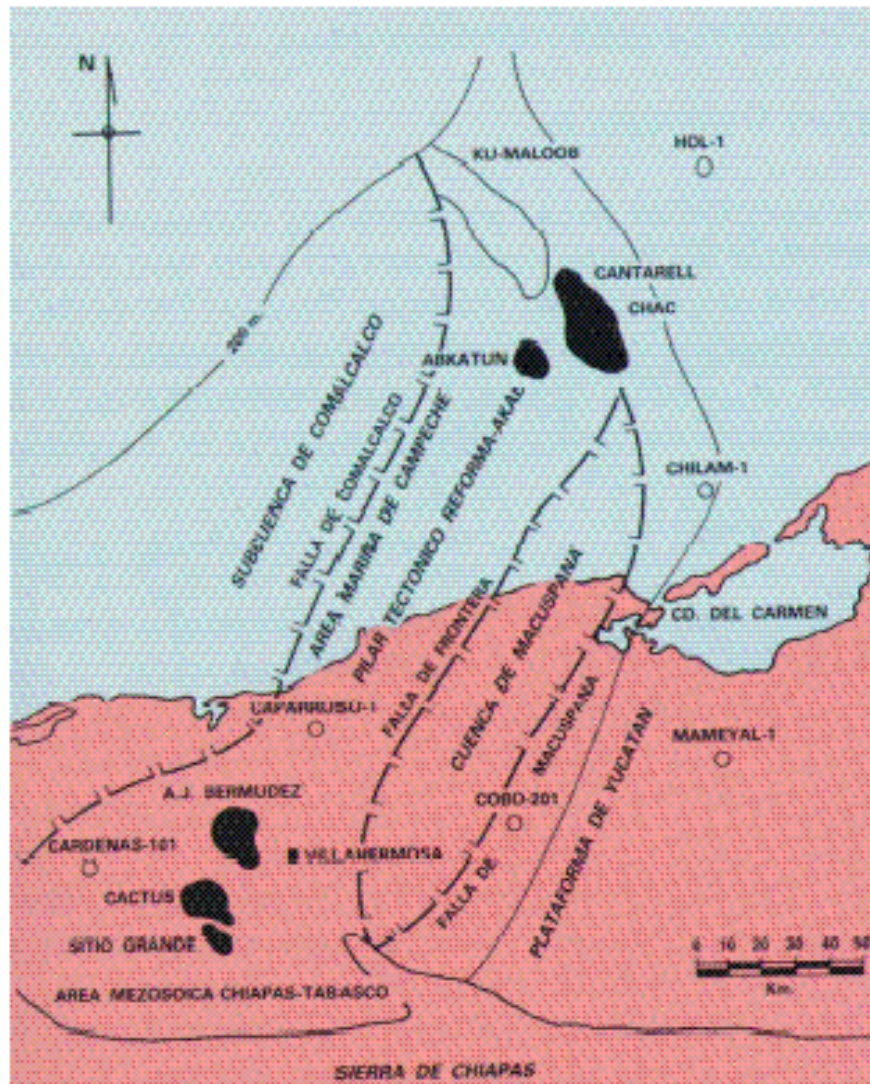


Fig 1.16 Geología estructural de la Sonda de Campeche (Sclumberger, 1984)

2 TIPOS DE PLATAFORMAS MARINAS

Las plataformas fig 2.1, están formadas por una subestructura y una superestructura y un modelo que será de perforación, producción o habitacional, se fabrican por separado en tierra y posteriormente se traslada y se colocan en su ubicación definitiva.

El volumen requerido de acero estructural en la construcción de cada una de estas plataformas, equivale a algunas de la estructura de acero de edificios con mayor altura construidos en México.

En México, el desarrollo del plan es ciertamente complejo pues implica no solamente la construcción de plataformas y la perforación de los pozos, sino también el establecimiento de un sistema continuo de abasto y comunicaciones. Los cuantiosos requerimientos de materiales y equipo durante la etapa de perforación alcanzaran un movimiento de más de 3,500 toneladas.



Fig. 2.1 Plataformas marinas en la Sonda de Campeche, (Aarón Sánchez)

PEMEX (Petróleos Mexicanos) ha tenido la necesidad de contar con plataformas marinas con el propósito de incrementar la producción de las reservas que se tienen en rocas mesozoicas de acuerdo a su programa exploratorio a partir de yacimientos prolíficos de aceite y gas en la zona Sur del área marina de Campeche.

En la década de los años 60 se inicio la instalación de plataformas marinas para explotar los yacimientos petrolíferos de aceite en el área denominada ATUN y ARENQUE

en el Golfo de México, dentro de esta área de referencia se hace necesaria la fabricación e instalación de plataformas marinas que cumplan con la extracción de hidrocarburos para pozos de exploración y desarrollo, así como el manejo y uso de plataformas que sirvan de enlace para la separación y rebombeo de hidrocarburos.

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar el proceso actual de fabricación e instalación de plataformas marinas en tirantes de agua convencionales para la perforación de pozos exploratorios y de desarrollo. Además aportar y proporcionar información técnica al respecto que sirvan para consulta, guía o aprendizaje de la metodología para la instalación de diferentes tipos de plataformas marinas.

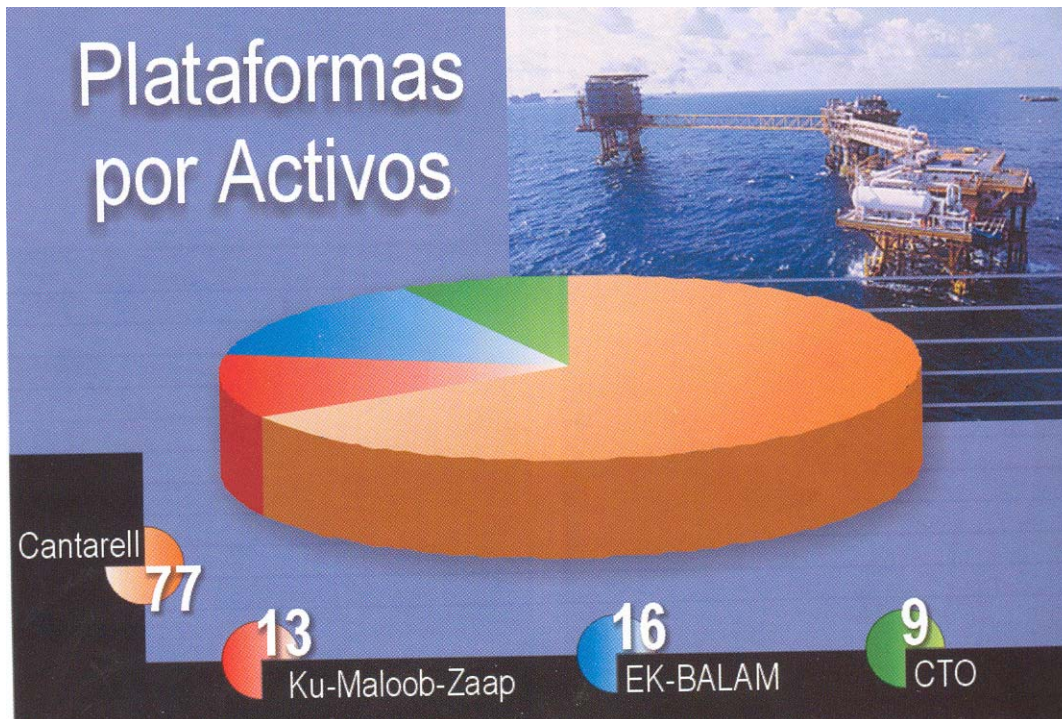


Fig 2.2 Número de plataformas existentes en la Sonda de Campeche. (PEMEX, 2001)

2.1 PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

La plataforma de perforación aloja el equipo mediante el cual se perfora el pozo y tiene como función colocar la tubería que permite explorarlo y el cabezal donde se instalará más tarde la plataforma de producción, este tipo de plataforma dispone de 12 conductores de 30 pulgadas de diámetro, hincados a 60 metros aproximadamente por debajo del lecho marino así como de un equipo compuesto por varios paquetes de perforación.

La cubierta consta de dos niveles uno de producción a 16 m sobre el nivel del mar y otro de perforación a 22 m. Esta cubierta es soportada por 8 columnas y se construye con 3 armadas de placa que unidas a las columnas forman marcos rígidos para disponer de mayor espacio, facilitando las instalaciones de los equipos y el movimiento de tuberías y simplificando su fabricación y colocación, aquí se localiza el equipo de perforación, los tanques y toda la maquinaria.

El periodo que se requiere para terminar las interconexiones es de 30 a 40 días y una vez finalizada dicha actividad la plataforma de este tipo es de 3,000 toneladas que incluye subestructura, pilotes y superestructura que son el equipo de perforación.

2.2 PLATAFORMA DE PRODUCCIÓN

Su función consiste en separar el gas del crudo bombeando a tierra, está compuesta por:

Una subestructura metálica de 8 columnas, fabricadas en 4 o 5 niveles según la profundidad de instalación, que varía entre 60 y 40 metros.

Una superestructura que consta de dos niveles soportada también por 8 columnas directamente acopladas a la subestructura.

Las cubiertas se construyen con viguetas de acero tipo "T" apoyadas sobre marcos rígidos hechos de placa y unidos estructuralmente a las columnas, su peso estimado es de 36,000 toneladas e incluyen además de subestructura, pilotes y superestructura, el trípode quemador y los puentes.

La plataforma de producción tiene acceso por puentes de enlace tanto en la plataforma de perforación vecina, como la plataforma de enlace.

2.3 PLATAFORMA DE ENLACE

Para manejar la producción de diferentes plataformas, es necesario instalar algunas de enlace, en los que se construye los cabezales de recepción y envío de aceite crudo y gas, a dichas plataformas de perforación.

Lo distribuyen a las plataformas de producción para su procesamiento, también una línea que recolecta el crudo con los oleoductos que lo transportan a tierra, a bordo de esta plataforma, se cuentan con instalaciones para lanzar y recibir tapones conocidos como *diablos* para limpiar el interior de las líneas.

2.4 PLATAFORMA HABITACIONAL

Esta como su nombre lo indica, brindar la asistencia habitacional que requieren los trabajadores de los diferentes complejos de producción de crudo y de gas. Esta plataforma puede albergar de 45 a 120 personas y cuenta con helicóptero y sistema de radio comunicación, sistema contra incendio, potabilización de agua, planta de tratamiento de aguas negras, cocina, comedor, sala de recreación, biblioteca, plantas generadoras de energía eléctrica y gimnasio.

2.5 PLATAFORMA DE REBOMBEO

La función específica de estas plataformas colocadas en el punto medio entre las de enlace y tierra, es aumentar la presión, capacidad de transporte del crudo.

Se dispone en ella de 8 tuberías de gas para acondicionar las bombas y 3 generadores con capacidad de 550 watts cada uno, suficiente para satisfacer sus necesidades de energía eléctrica.

2.6 PLATAFORMA DE ALMACENAMIENTO DE DIESEL

Se encuentra anexa a la estación de rebombeo y es la encargada de suministrar el combustible diesel para el consumo de las turbo bombas, cuenta con 5 tanques de almacenamiento de diesel con capacidad de **499,870 LBS**, cada uno.

2.7 PLATAFORMA DE COMPRESIÓN DE GAS

Su función es suministrar al gas la presión necesaria para su transporte, así como su acondicionamiento, por ejemplo el endulzamiento de gas amargo. El gas comprimido es enviado a las correspondientes plataformas de enlace de gas.

Para comprimir el gas dulce se cuenta en cada plataforma con cuatro módulos de compresión, siendo la capacidad total de compresión de 360 millones de pies cúbicos por plataforma.

Los módulos de compresión, permiten aprovechar el 98% de gas natural, lo que evita quemarlo a la atmósfera. Los primeros módulos fueron colocados en el complejo AKAL-C, en noviembre de 1981.

2.8 COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA

La estructura es el elemento que servirá como soporte para los equipos de perforación y tiene un desarrollo que va desde el fondo del mar hasta 71 pies sobre el nivel del mar. Este elemento está conformado por dos partes principales la subestructura (jacket) y la superestructura (deck).

Subestructura: es de tipo piramidal con 8 patas de 50 pulgadas de diámetro interior armadas en una matriz de 2x4 pulgadas, cimentadas a base de pilotes de acero, cuentan con cuatro o cinco niveles de arriostamiento horizontal, dependiendo del tirante de agua en el cual se va a instalar la plataforma y está integrada por elementos tubulares en su totalidad.

Las cuatro patas de esquina tienen una pendiente de 1:8 (horizontal-vertical), las piernas inferiores tienen una inclinación de 1:8, el sistema de arriostamiento es a base de diagonales sencillas en forma de X y K, tanto en los ejes como en las plantas, usando elementos tubulares que van desde 12 a 30 pulgadas, en el arriostamiento ubicado en el nivel superior se encuentra una serie de pasillos cuya función principal es la de conducir a los muelles que tiene la subestructura en ambos lados.

Los materiales usados para la subestructura son aceros de la clase ASTM-A36, es arriostamiento de planos horizontales y verticales en aproximadamente dos terceras partes de las patas, en las uniones entre elementos principales de arriostamiento. La subestructura tiene además defensas en cada pata, que sirven para amortiguar el golpeteo de los barcos o lanchas que con fines de proveer material o hacer diversas operaciones se acercan a la plataforma.

Superestructura: la superestructura cuenta con dos cubiertas, una cubierta inferior y la otra cubierta principal y piso de preventores, respectivamente, sobre el piso de preventores serán instalados los equipos de perforación y sobre el piso de producción, serán instalados los árboles de válvulas separadores de prueba, bombas de pozo profundo, tanque de almacenamiento de agua y bomba para el sistema contra incendio, las cubiertas están soportadas por 8 columnas de 48 pulgadas de diámetro, la separación entre las columnas será de 40 pies en el sentido longitudinal y de 45 en el sentido transversal. Ambas cubiertas tienen una área nominal de 75×150 pies, la distancia libre entre la cara inferior de las trabes de la cubierta principal y la rejilla de la cubierta inferior es de 13.7 pies.

Los sistemas de piso de ambas cubiertas están integrados por trabes principales transversales y longitudinales, trabes intermedias transversales y longitudinales, trabes perimetrales y largueros longitudinales. Todas las trabes serán de sección prismática de tres placas soldadas a excepción de los largueros que serán perfiles rolados.

El piso de producción nivel inferior es cubierto en su totalidad por medio de rejillas Irving, mientras que el piso del nivel superior es cubierto por tablonés en el área donde va montada la torre de perforación, es decir en el área de los conductores y el resto del piso se deja solo con las trabes a fin de soportar los equipos de perforación.

Las condiciones ambientales de diseño incluirán condiciones de operación y tormenta características del lugar.

Las condiciones ambientales de operación, corresponderán a situaciones de viento, oleaje y corriente de tal magnitud que aun permitan el desarrollo normal de actividades en plataforma. Las condiciones de tormenta corresponderán a situaciones ambientales desfavorables, características de una tormenta con un periodo de ocurrencia de una cada cien años.

Condiciones de operación

	magnitud
1. viento	32mph
2. mareas	2.5ft
3. mareas durante condiciones de operación	1.5ft

La profundidad del mar o tirante de agua es considerado a fin de poder calcular la velocidad de la corriente en función de aquella.

En la protección anticorrosiva de la estructura se usan diferentes sistemas anticorrosivos para las distintas zonas de corrosión en que se clasifican las plataformas.

Zona de oleaje, todo elemento estructural localizado dentro de esta zona se protegerá aumentando el espesor requerido por diseño y recubriéndolo con una película protectora de acabado.

Zona sumergida, esta zona se localiza entre el lecho marino y la zona de oleaje, todos los elementos comprendidos en esta zona serán mediante un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio.

Zona enterrada, la porción de pilotes penetrada en el suelo marino se protegerá con el mismo sistema catódico corrosivo para la zona sumergida.

Para el análisis y diseño de traveses principales, largueros y columnas de la superestructura, para los elementos de la subestructura y el diseño de pilotes se tomaron en cuenta las siguientes cargas vivas y cargas muertas, mismas que serán mostradas en kips, unidades de diseño que es equivalente a 1000 libras.

La cubierta inferior de la superestructura soporta los siguientes equipos y cargas uniformes.

Tabla 2.1 Cargas que soportara la cubierta inferior de la superestructura

EQUIPO	CANTIDAD (PIEZAS)	CARGAS MUERTAS (KIPS)	CARGAS VIVAS (KIPS)
Árbol de válvulas	12	184.80	184.80
Bomba de agua de mar	2	9.4	9.4
Bomba de agua contra incendio	1	7.5	10.6
Bomba para agua contra incendio	1	9.7	11.5
Separador de prueba	1	95.6	124.6
Lanzador de diablos	1	49.6	80.4
Sumidero de drenajes	1	18.3	226.4
Tanque de agua fresca	2	33.0	226.4
Bote salvavidas	1	20.6	32.0
Cabina marina	1	-	25.4
Total		428.5	718.6

La cubierta principal soportara los siguientes paquetes de equipo para perforación. Los pesos muertos y de operación de estos paquetes se enlistan a continuación.

Tabla 2.2 Capacidad de carga de la cubierta principal (equipo de perforación)

CONCEPTO	CARGAS MUERTAS (KIPS)	CARGAS VIVAS (KIPS)
Maquinas	650	936
Vivienda y heliopuerto	670	770
Almacén	330	1080
Bombas	704	704
Lodos	148	994
Líquidos	152	940
Torre y pantalla	518	625
Grúa de pedestal	87	227
Tubería	1300	1300
Total	4559	7576

2.9 INSTALACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Con estudios preliminares se propone las coordenadas donde se va a instalar la plataforma, es necesario hacer realizar estudios tanto geofísicos como geotectónicos a fin de comprobar si es aceptable su instalación en dicho punto o bien si habrá de buscar una nueva localización, la información geotécnica tiene como objetivo determinar las condiciones físicas del subsuelo marino en el lugar propuesto para la instalación de la plataforma, así como desarrollar criterios para el diseño y construcción de los pilotes de cimentación.

Por otro lado, la información que se obtiene con el estudio geofísico, sirve para determinar la existencia de riesgos potenciales a los cuales estarán sometidas las plataformas, como pueden ser afloramientos de roca, arrecifes de coral, presencia de gas somero en los sedimentos de roca no consolidados y fallas geológicas en la superficie. Los objetivos que persigue un estudio geofísico son los siguientes.

- Determinar la batimetría del lugar
- Obtener las características del suelo marino
- Detectar la presencia de posibles paleocanales
- Detallar las primeras unidades de sedimentos no consolidados, así como su espesor y factores que los afectan
- Investigar la estratigrafía somera para fines de correlación de datos de sísmica profunda
- Determinar los estratos en los primeros 300m de profundidad

Cuando la localización propuesta se confirma es decir que el estudio Geofísico concluye que se puede instalar la plataforma, se inician los trabajos pertinentes a trasladar la estructura de los patios de fabricación al sitio donde se colocara. Dicho traslado se lleva a cabo por medio de un chalán que tiene las siguientes características: 250 pies de largo, 72 pies de ancho y 16 pies de profundidad, equipados con patines de lanzamiento dobles con una longitud de 230 pies y con 40 pies de centro a centro, 2 winches descubiertos con

malacate con tensión de cable sencillo de 90,000 lbs, 4 corredores de lanzamiento de acero en la proa para ser remolcado.

Debe inspeccionarse que una vez montada la subestructura sobre el chalán de lanzamiento sean revisados los siguientes puntos.

- Todas las válvulas de inundación cerradas
- Las válvulas de descarga de aire (arriba de la subestructura) cerradas
- Todas las protecciones de fabrica, deberán retirarse de las válvulas de inundación
- Todos los estrobos para las maniobras de izaje deberán estar asegurados a la plataforma de maniobras
- Cables para el arrastre de la pieza y los cabos de polipropileno para retenida y guía deberán estar completamente asegurados en su posición para el arrastre
- Los winches y las bombas de lastrado deberán operar correctamente

En un segundo chalán se transporta la tubería conductora y los pilotes, en un tercer chalán se transporta la superestructura, una vez teniendo todos los puntos anteriores checados, se procede al transporte de la estructura por medio de remolcadores hacia el sitio donde será colocada.

Para desarrollar el trabajo de la instalación de la plataforma, es necesario contar con el apoyo de un barco grúa con capacidad de izaje de 2000 toneladas, así como con remolcadores para trabajos auxiliares tanto de acoderamiento del barco como para el izaje de la estructura.

Un barco posicionador se encarga de ubicar el punto exacto donde se pretende instalar la plataforma, por medio de sistemas de posicionamiento una vez localizado el punto exacto se lanza la boya al mar la cual servirá como referencia al barco grúa a la hora de posicionarse llegando al punto de trabajo, el barco grúa procede a colocarse cuidando la posición Norte-Sur, que es la dirección de los vientos predominantes en la Sonda de Campeche, factor muy importante al tomar en cuenta el momento de la instalación de la plataforma, ya que esta deberá quedar orientada de tal modo que los vientos entren por el lado del paquete habitacional y salgan por el lado donde se encuentre los conductores, a fin de que puedan arrastrar consigo, gases u otras sustancias toxicas, evitando así que estas pudieran dañar a los trabajadores o alterar el funcionamiento de las máquinas.

Una vez posicionado el barco con una tolerancia que oscila en un radio de 50 m, la primera actividad será revisar el fondo marino con buzos, a fin de detectar si existen obstáculos para la correcta instalación de la subestructura, en caso afirmativo se retira desde la superficie con cables de acero de los winches hasta quedar completamente limpio el fondo marino, en un área de 200 pies por 125 pies.

Colocación de la subestructura en el mar. Para bajar la subestructura del chalán existen dos procedimientos, el primero consiste en lanzar la subestructura al mar y el segundo izar la pieza estructural directamente del chalán, de estos dos procedimientos, el más cómodo podría ser el segundo, sin embargo en algunas ocasiones no es posible llevarlo a cabo

debido a que por lo grande y brumoso de la base de la subestructura que tiene forma de pirámide, es imposible acercarse al chalán con la pieza estructural al barco sin que ésta sufra daños, razón por la que se hace necesario lanzar la subestructura al mar y una vez en el mar acercarla al barco grúa para la recuperación, sin embargo se mencionan los dos métodos, ya que el segundo se utiliza cuando se instalan tetrápodos de perforación.

Se instala el primer pozo perforado con equipo auto-elevable, después que se haya concluido su etapa de perforación y el objetivo programado, según el número de patas, se clasifican en trípodas (tres patas) y tetrápodos (cuatro patas).

Trípodos. Son plataformas con estructura y superestructura de forma triangular sujetas por tres patas sobre pilotes de 36 pulgadas de diámetro con espesores de 1.5 a dos pulgadas de diámetro y tipo de acero ASTM-A36 y ASTM-A537, la penetración del lecho marino de estos pilotes y conductores depende de la configuración del subsuelo que varía de 80 a 100m, que generalmente dentro de estas instalaciones se cuenta con preparación para tres pozos conductores y el helipuerto.

Tetrápodos. Estas plataformas son fabricadas e instaladas con el mismo objetivo que la anterior, su diferencia es que están soportadas por cuatro patas con pilotes de 46 pulgadas de diámetro y espesores de 1.25 pulgadas a 2.25 pulgadas de acero tipo ASTM-A36 y ASTM-A537, tienen preparación para un máximo de 6 conductores de 30 pulgadas de diámetro.

2.10 CIMENTACIÓN DE PLATAFORMAS

Las plataformas, en general, difieren mucho dependiendo del tipo de actividad que desempeñan. Así, las hay de producción, de compresión, de enlace, habitacionales, de inyección de agua, de estabilización de crudo, de rebombeo, de comunicaciones y de perforación, siendo estas últimas las más numerosas dentro del conjunto de Petróleos Mexicanos en la Sonda de Campeche.

La cimentación para cada una de éstas es igual, sólo varía el número de pilotes o columnas principales, el cual depende del tipo y peso de la estructura que va a soportar.

Los pilotes, al igual que las estructuras, se construyen en los patios de fabricación; éstos se localizan en ciudades como Tampico, Tuxpan y Veracruz, aunque la mayoría están en Tampico. Y aunque las dimensiones de éstos son determinadas por medio de un análisis estructural, modelando el suelo de cimentación a través de curvas P-Y y T-Z, los diámetros más comunes y con los cuales se han podido soportar las cargas que transmiten las condiciones ambientales y del equipo son de 36, 42, 45, 54 y 60 pulgadas de diámetro.

Cuando se piensa en el diseño de una plataforma, el primer factor que debe tomarse en cuenta es que la estructura, si se encuentra operando, tenga la capacidad de resistir los efectos de las cargas del ambiente tales como oleaje, viento, corriente y sismos, así como las cargas que se generan durante su vida útil (efecto del oleaje que genera la fatiga de los elementos, carga y descarga de la plataforma que ocasiona una carga súbita, con la cual debe tenerse especial cuidado).

Adicionalmente, se debe considerar que la plataforma esté diseñada para trabajar en condiciones normales de operación, para lo cual debe considerarse el proceso de fabricación e instalación, de tal manera que garantice que todas las partes de la estructura, incluyendo la cimentación, tengan un comportamiento adecuado.

Algunos de los riesgos geológicos que pueden impedir el asentamiento de una estructura son la presencia de corales, bolsas de gas, movimientos o fallas del suelo y canales enterrados, entre otros. Por ello, otro aspecto fundamental en esta actividad es la exploración geofísica, para lo cual se equipa un barco con instrumentos que emiten ondas sínicas, mismas que se desplazan a través del agua cubriendo toda la zona donde se pretende hacer la instalación de la plataforma. Por lo tanto, cuando se localiza un material de distinta densidad, parte de esa energía rebota y parte continúa hasta que se encuentra otra con diferente densidad. De acuerdo con el tiempo que tardan en ir y regresar, se determina a qué profundidad se encuentra ese material con densidad diferente, lo que contribuye a formar los diferentes estratos de los suelos.

Una vez que se ha estudiado completamente la zona es necesario realizar un plano en el que se identifiquen los sitios propicios y desfavorables para la instalación de la cimentación y, posteriormente, con ayuda de otro barco, se efectúa la exploración geotécnica, es decir, se perfora el subsuelo a fin de obtener núcleos que más tarde serán analizados en el laboratorio.

Ya con este par de estudios (geofísico y geotécnico) y el análisis estructural de la plataforma (por medio de éste se define la carga que va a transmitirse al pilote), se genera una curva de capacidad de carga, la cual sirve para determinar cuál debe ser la longitud de penetración del pilote bajo el lecho marino.

Ahora bien, una vez fabricadas las tres partes de la plataforma, se trasladan a la zona de instalación. La subestructura es la primera que se transporta, debido a que es la que queda bajo el agua. Esta se lanza al mar y, con ayuda de un barco grúa, se coloca en posición vertical. Después se trasladan los pilotes (fabricados e izados por partes), y se colocan dentro de las piernas (elementos principales de soporte) de la subestructura, también con ayuda de un barco grúa, hasta que alcance la profundidad de diseño.

Ya en el lecho marino los pilotes quedan enterrados (hincados) a una profundidad de entre 60 a 120 metros, dependiendo del tipo de suelo que se tenga y de la estructura que se soporte; actividad que se hace por medio de un martillo de grandes dimensiones (Steam Hammer) accionado por vapor, el cual levanta un vástago que al dejarse caer impacta sobre la cabeza del pilote para su enterrado.

En este rubro es esencial determinar, antes de la instalación, el tipo de martillo que se va a usar para el hincado, ya que si no tuviera la capacidad necesaria para su objetivo, prácticamente se tendría una estructura pérdida.

Cabe destacar que durante el lanzamiento, las columnas permanecen tapadas para mantener un volumen vacío dentro de las piernas para así tener cierta flotabilidad; tapas que

deben quitarse cuando la subestructura esté posicionada para que permitan la entrada de los pilotes.

Concluido este proceso, se procede a soldar el pilote con la subestructura, con lo cual puede decirse que la estructura está prácticamente cimentada y, después se instala la superestructura, que es la última parte en ser transportada.

Y aunque los criterios que se aplican para el diseño de una plataforma son generales, es importante enfatizar que existen situaciones particulares que deben tomarse en cuenta para elaborar diseños acordes con el sitio. Por ello, para complementar este proceso con condiciones reales, se realizan estudios del comportamiento de los suelos para tener una mejor aproximación.

3 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS

La ciencia que estudia los aspectos relacionados con la ocurrencia de temblores de tierra, terremotos o sismos se denomina sismología. Esta es una ciencia joven, puesto que gran parte de sus métodos e instrumentos de observación fueron desarrollados a lo largo del siglo XX. A pesar de esto, la sismología ha logrado avances notables. Quizá una de sus contribuciones más valiosas es la tectónica de placas.

La hipótesis fundamental de la tectónica de placas es que la superficie de la tierra está formada por un gran número de bloques intactos, denominados placas, las cuales se desplazan entre sí. La corteza terrestre se encuentra dividida en seis placas continentales (Africana, Americana, Antártica, India–Australiana, Euroasiática y Placa del Pacífico) y en cerca de 14 placas de tamaño subcontinental (por ejemplo, Cocos, Caribe, Nazca, etc.), como se observa la Figura 3.1.

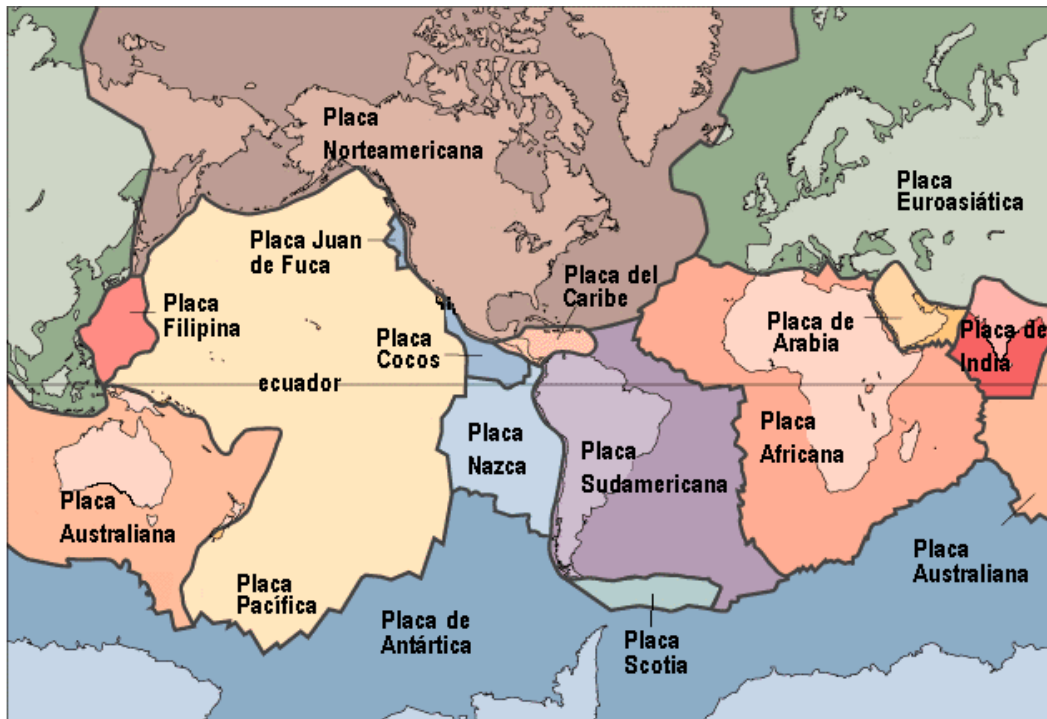


Fig 3.1 Placas tectónicas continentales y algunas subcontinentales (SNS, 2002)

Los desplazamientos aparentemente aleatorios de las placas se deben a movimientos convectivos en la capa intermedia de la Tierra. En los límites entre placas se generan fuerzas de fricción, las cuales mantienen atoradas dos placas adyacentes, produciendo grandes esfuerzos en los materiales. Cuando dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca se produce una ruptura violenta que conlleva una liberación repentina de la energía acumulada, generándose un temblor que irradia dicha energía en forma de ondas. Estas ondas se propagan en todas direcciones a través de la Tierra.

El lugar en el interior de la tierra en donde se origina un sismo se denomina hipocentro y su proyección sobre la superficie se denomina epicentro. Observaciones sobre la localización de los epicentros han revelado que éstos se concentran en las cercanías de las fronteras entre placas, lo cual provee de evidencia a la teoría de tectónica de placas.

También se generan sismos asociados a fenómenos locales, como actividad volcánica o la extracción de fluidos o materiales del subsuelo que provocan su colapso.

En condiciones ideales, un análisis completo de la respuesta del terreno ante excitaciones sísmicas, debería modelar el mecanismo de ruptura en la fuente del sismo, la propagación de las ondas de esfuerzo desde la fuente hasta la frontera entre la roca y el depósito de suelo y finalmente, determinar la influencia que tienen los estratos del depósito de suelo en la respuesta de la superficie del terreno. En la realidad, el mecanismo que genera la ruptura en la falla es demasiado complicado y el fenómeno se conoce poco. Además, la forma en que se produce la transmisión de energía desde la fuente hasta el sitio de análisis está sujeta a muchas incertidumbres por lo que éstas consideraciones no son prácticas para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería.

En la mayoría de los casos, el depósito de suelo es el factor más importante que afecta las características de los movimientos del terreno, a pesar de que las ondas sísmicas viajan solamente unas decenas de metros a través del suelo, en tanto que recorren cientos de kilómetros a través de roca.

3.1 Tipos de ondas sísmicas

Los métodos de campo para determinar las propiedades dinámicas de un depósito de suelo constan de dos partes:

1. generación de onda o tren de ondas en el suelo
2. registro e interpretación de los efectos de dicha excitación en el terreno

La primera parte puede realizarse con fuentes diversas para generar la onda (una explosión, un golpe con un martillo pesado, un excitador mecánico, etc.)

El registro involucra un problema de interpretación para identificar que el tipo de onda generado sea realmente el deseado, y otro de elección del equipo de registro

Los métodos de campo proporcionan información relativa a la forma en que se propaga la excitación en el suelo lo cual aunado al tipo de onda generado y al tiempo, t , en que llega de un punto a otro determinado, permite estimar las velocidades de propagación de onda en el material. Finalmente, usando la teoría de elasticidad se infieren las propiedades dinámicas del suelo

Algunos de los términos más comunes en el estudio de respuesta sísmica son (ver figura 3.2):

- Sismo: Es un fenómeno natural, cuyo origen es una ruptura repentina que se extiende sobre una gran distancia en las rocas que constituyen la corteza de la Tierra, y que produce de forma instantánea liberación de energía elástica acumulada
- Hipocentro (o foco): Es el punto en el interior de la tierra donde se origina dicha ruptura
- Epicentro: Es la proyección del hipocentro sobre la superficie terrestre
- Profundidad del hipocentro (o profundidad del foco): Es la distancia desde el hipocentro hasta el epicentro
- Distancia hipocentral: Es la distancia desde el hipocentro a algún sitio de observación
- Distancia epicentral: Es la distancia desde el epicentro a algún sitio de observación

Si un sitio de observación está cerca del hipocentro o falla de ruptura, en la señal registrada (acelerograma) se notará claramente el arribo de ondas P y S. Sin embargo, para el caso donde el sitio de observación está lejos del hipocentro, la señal contendrá más reflexiones y refracciones de ondas, lo cual hará más complicada la distinción del arribo del tipo de ondas en el acelerograma registrado.

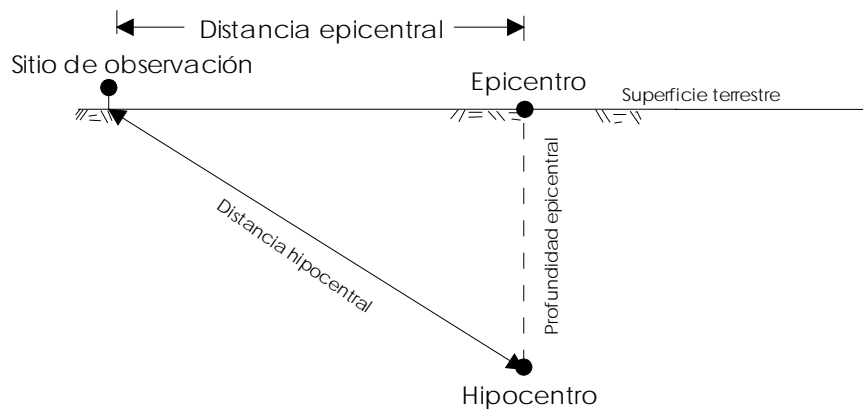


Fig 3.2. Diagrama esquemático del hipocentro

Las ondas sísmicas que se originan en el hipocentro se propagan en todas direcciones y llegan a la superficie terrestre con diferentes trayectorias. De esta forma, las ondas sísmicas se propagan de forma compleja como resultado de su trayectoria de propagación, tipos de medio (tipo de suelo) y su topografía. Naturalmente las ondas, en su viaje, muestran características comunes como la longitud de onda o periodicidad.

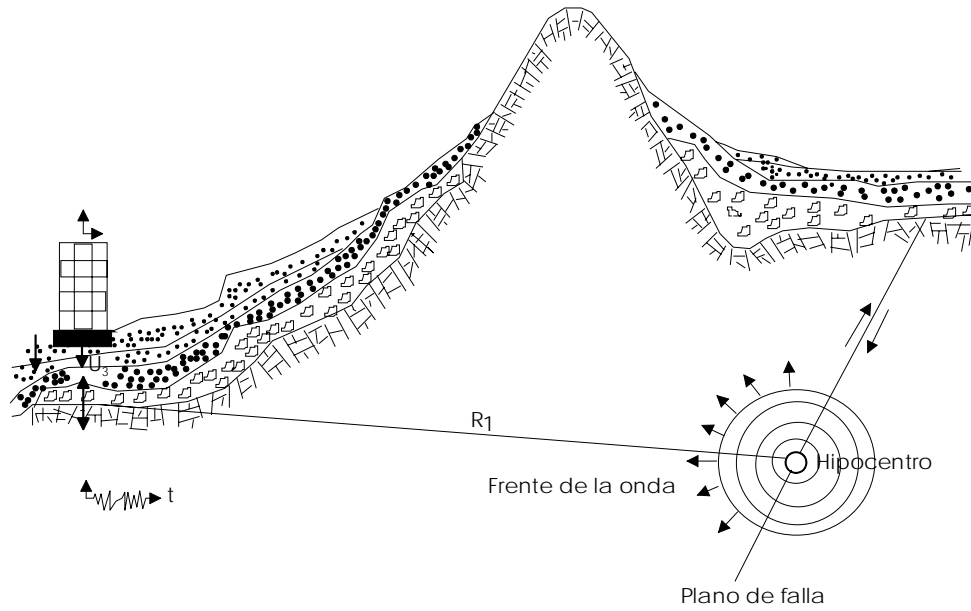


Fig 3.3. Propagación de la energía sísmica desde el hipocentro hasta la estructura (Bertero, 1992)

Durante un sismo, la energía disipada se convierte en ondas sísmicas de cuerpo y en ondas de superficie. Estas ondas al viajar por la Tierra sufren reflexiones, refracciones, atenuaciones o amplificaciones y llegan en forma de excitación sísmica hasta el basamento rocoso que se encuentra bajo el depósito de suelo.

En geosísmica las ondas sísmicas se clasifican, como se muestra en la figura 3.4

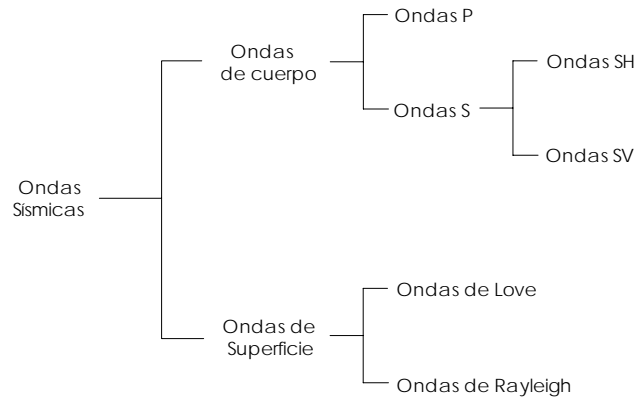


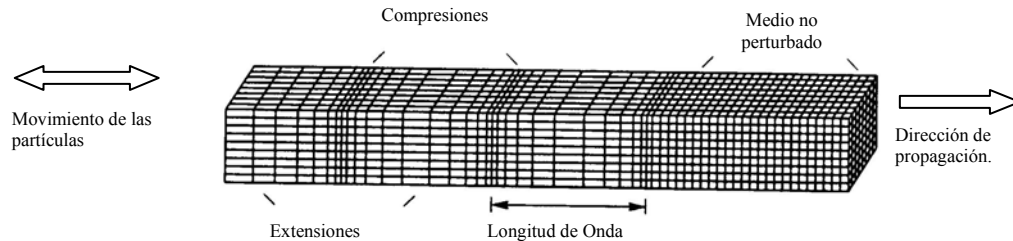
Fig 3.4. Tipos de ondas sísmicas

Las ondas de cuerpo, las cuales viajan a través del interior de la Tierra, son de dos tipos: ondas P y ondas S. Las ondas P son conocidas como ondas primarias, compresionales o longitudinales, porque transmiten compresiones y extensiones (ver Figura 3.5a). En este caso, las partículas del medio se mueven en el mismo sentido en que se propaga la onda. Estas ondas son similares a las del sonido, las cuales se pueden propagar a través de sólidos y líquidos.

Las ondas S, también conocidas como secundarias, de corte o transversales, causan deformaciones de corte a medida que se propagan a través de un cuerpo (ver Figura 3.5b).

En las ondas S, la dirección del movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda y puede usarse para dividir la onda S en dos componentes: SV en donde el plano del movimiento es vertical y SH en donde el plano del movimiento es horizontal. Las ondas S no pueden propagarse a través de fluidos, debido a que estos presentan resistencia nula a los esfuerzos de corte.

(a) Onda P.



(b) Onda SV.

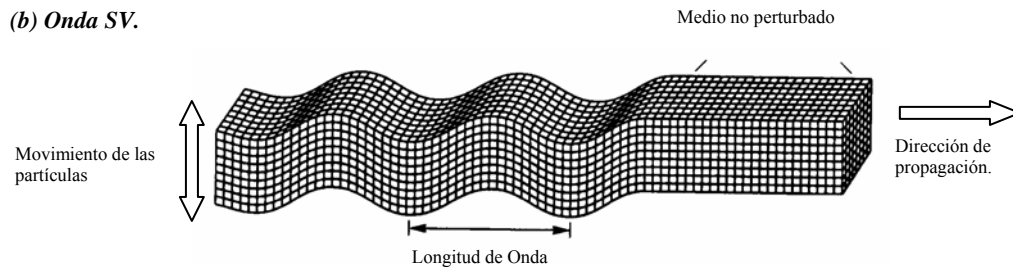


Fig 3.5 Deformaciones producidas por ondas de cuerpo
Modificado de Bolt (1978)

Las ondas de superficie son el resultado de la interacción entre las ondas de cuerpo y la superficie o los estratos superficiales de la Tierra. Las ondas superficiales de Rayleigh y Love son las más importantes para propósitos de ingeniería.

Las ondas de Rayleigh se producen por la interacción de ondas P y SV con la superficie de la tierra. En este caso, la trayectoria que describen las partículas del medio es elíptica retrógrada y ocurre en el plano de propagación de la onda (ver Figura 3.6a).

Las ondas de Love son el resultado de la interacción de ondas SH con un estrato superficial de suelo blando (Figura 3.6b). En estas ondas el movimiento de las partículas del medio es perpendicular a la dirección de propagación, como ocurre en las ondas S, sólo que polarizadas en el plano de la superficie de la Tierra.

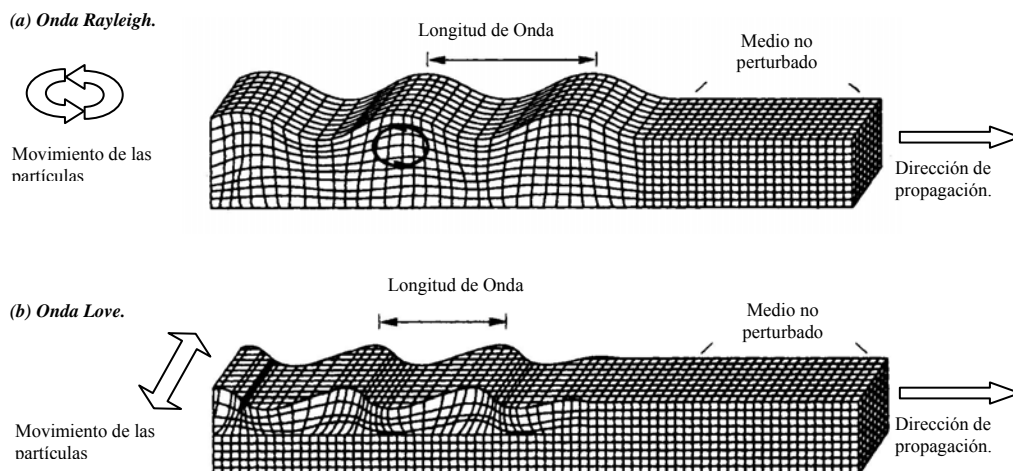


Fig 3.6 Deformaciones producidas por ondas de superficie Modificado de Bolt (1978)

3.2 Propiedades dinámicas más importantes

Cuando una muestra de suelo se somete a carga dinámica, en general, ocurren dos tipos de deformaciones; una transitoria que varía cíclicamente con la carga, y otra permanente que se acumula durante la aplicación de los esfuerzos cíclicos. En la figura 3.7 se muestran ambos componentes de la deformación. Conviene señalar que la deformación cíclica o transitoria es la que se emplea para definir los parámetros de rigidez y amortiguamiento del suelo, y la deformación permanente se usa para estimar los desplazamientos permanentes en las cimentaciones causadas por la acción de los sismos.

El comportamiento dinámico de los materiales granulares (gravas y arenas) es muy distinto a los materiales finos (arcillas y limos).

El comportamiento cíclico de las arcillas se puede caracterizar completamente con las cuatro propiedades siguientes.

- La variación del módulo de rigidez al cortante con la deformación angular.
- El cambio del amortiguamiento histerético con la deformación angular.
- La relación esfuerzo-deformación.
- Resistencia ante carga cíclica.
- La relación de Poisson es otra propiedad requerida para la descripción de la respuesta dinámica del suelo; sin embargo su variación entre 0.4 y 0.5 es relativamente pequeña y en este intervalo tiene efectos pequeños en la respuesta sísmica, por lo cual, su investigación detallada rara vez se justifica.

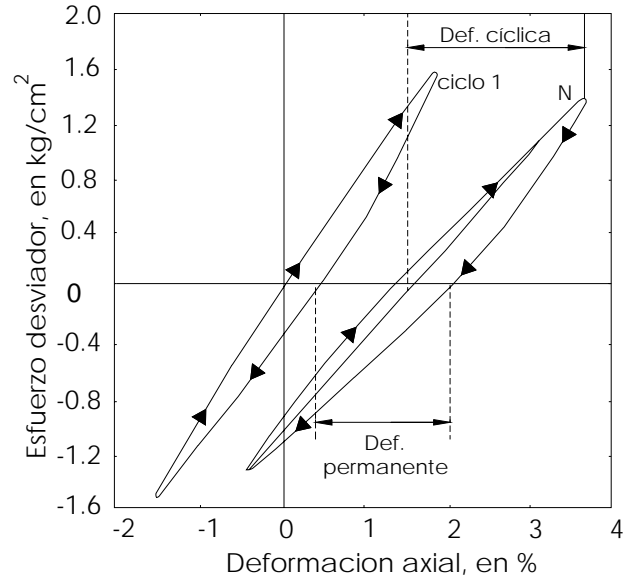


Fig 3.7 Componentes de deformación en carga dinámica, (Modificada de Taboada, 1989)

3.2.1 Módulo de rigidez al esfuerzo cortante

La mayoría de los suelos exhiben relaciones esfuerzo-deformación curvilíneas (Fig 3.8), en donde el módulo de cortante, G , es expresado usualmente como el módulo secante o pendiente de la recta determinada por los puntos extremos de la curva histérica (A-A').

Cuando el espécimen del suelo se somete por primera vez a esfuerzos desviadores cíclicos, sufre deformaciones parcialmente irreversibles, por tanto, la curva esfuerzo deformación en la carga es diferente a la de descarga y la de recarga.

El ciclo completo de carga y descarga se dibuja idealizadamente como un lazo de histéresis cerrado, el cual se puede representar por medio del módulo de rigidez al cortante, G , fig 3.9.

En la misma figura se puede observar claramente que G varía con la deformación angular, al aumentar ésta, el modulo disminuye ($G_1 > G_2$).

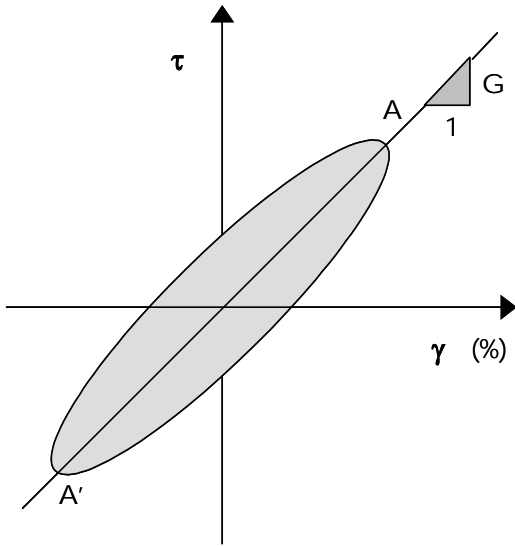


Fig 3.8 Curva esfuerzo-deformación en un ensayo cíclico

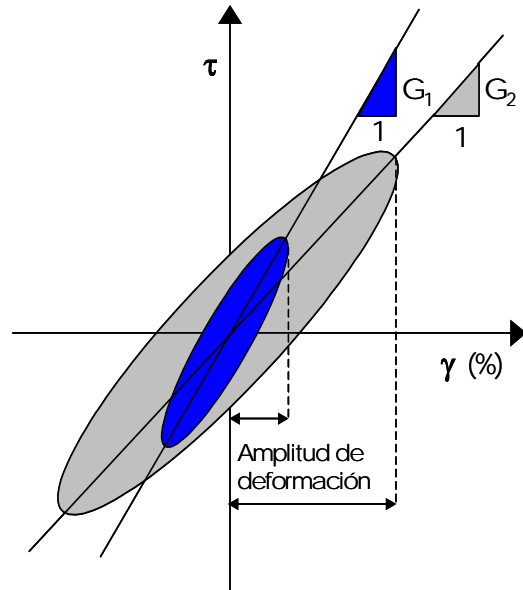


Fig 3.9 Relación histerética esfuerzo deformación para diferentes amplitudes de deformación

3.2.2 Modelación numérica de la relación G-γ

Romo (1990) mostró que el parámetro dominante en la definición de las curvas de la fig 3.10 es el índice de plasticidad. Por consiguiente, es posible establecer expresiones analíticas para representar la variación del módulo de rigidez en función de la deformación angular y del índice de plasticidad. Este tipo de relaciones serian de gran utilidad en la práctica ya que permitirían estimar curvas normalizadas (como se presenta en la figura 3.10 a partir del valor del I_p). La siguiente expresión reproduce con buena aproximación los resultados experimentales para materiales arcillosos figura 3.11.

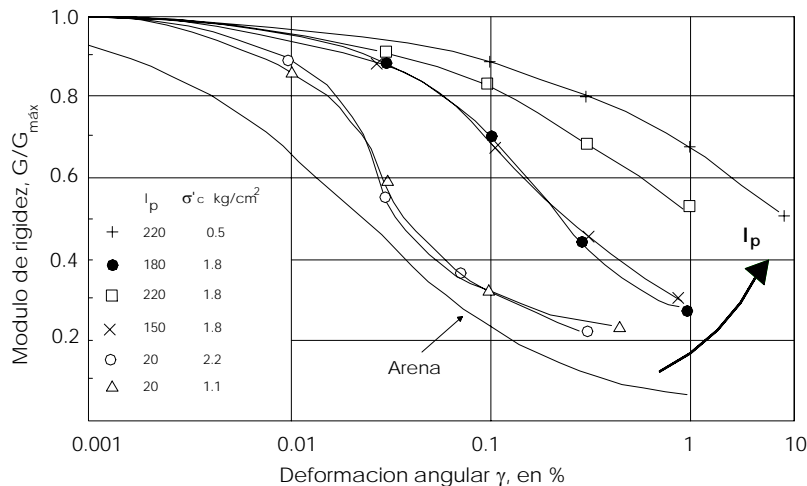


Fig 3.10 Efecto del índice de plasticidad, IP, (Romo, 1990)

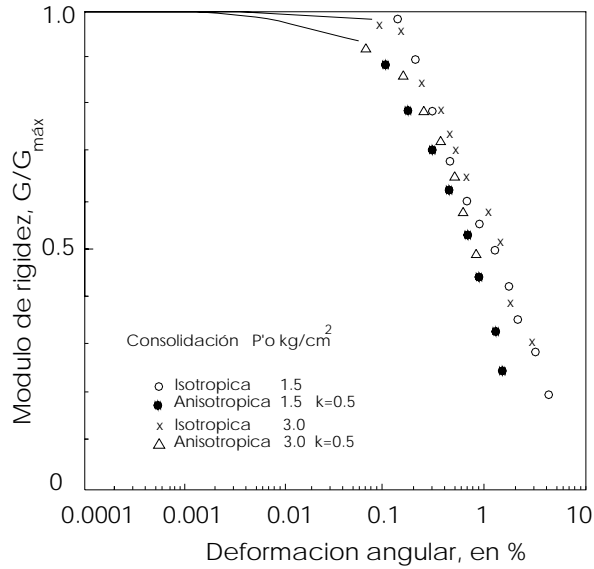


Fig 3.11 Curva de atenuación $G/G_{máx}$ vs γ (Modificada de Taboada, 1989)

$$G = G_{máx} [1 - H(\gamma)] \tag{3.1}$$

$$H(\gamma) = \left[\frac{(\gamma / \gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma / \gamma_r)^{2B}} \right]^A \tag{3.2}$$

Donde. G es el módulo de rigidez al cortante para una cierta γ
 $G_{máx}$ es el módulo de rigidez al cortante para $\gamma \leq 0.0001\%$
 γ_r es una deformación de referencia en % (50 % de $G/G_{máx}$)
 A y B son parámetros del suelo

Los valores de γ_r , A y B , están en función del índice de plasticidad, y se presentan en la figuras 3.12 a 3.14, respectivamente.

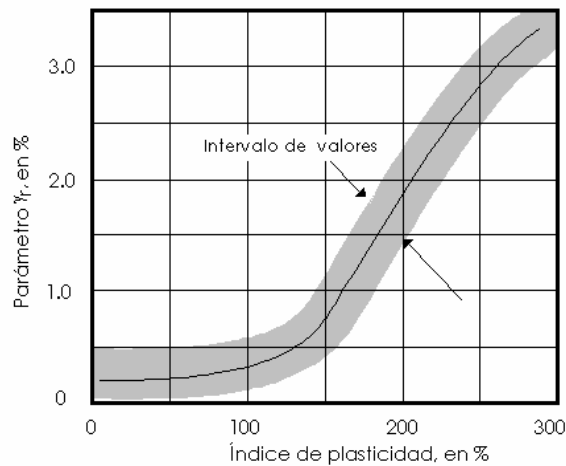


Fig 3.12 Efecto del índice de plasticidad, IP en el parámetro γ_r , (Romo, 1990)

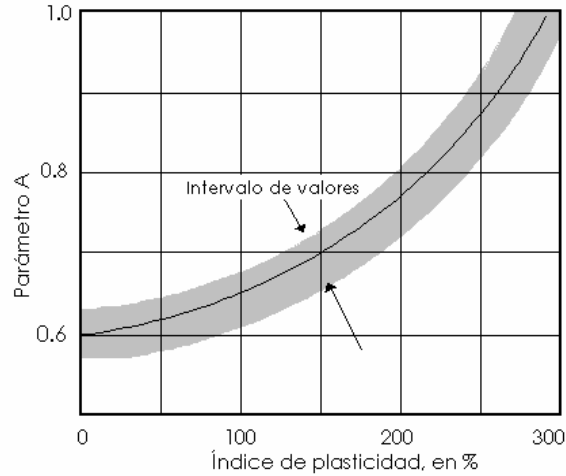


Fig 3.13 Efecto del índice de plasticidad, IP en el parámetro A, (Romo, 1990)

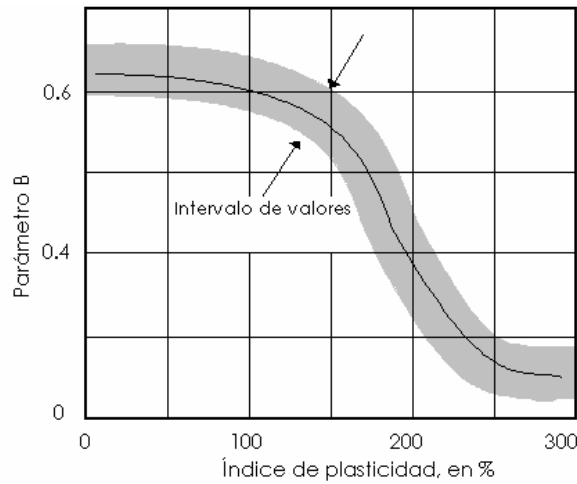


Fig 3.14 Efecto del índice de plasticidad, IP, en el parámetro B, (Romo, 1990)

3.2.3 Relación de amortiguamiento histerético, λ

Cuando un suelo se somete a la acción de carga dinámica, su respuesta esfuerzo-deformación se caracteriza por la aparición de ciclos de histéresis que se muestra en la figura 3.15, que son la manifestación de la capacidad que tiene el suelo para disipar energía. Por otra parte, debido a la rigidez del suelo, éste almacena energía potencial en cada ciclo de carga. La relación entre energía disipada y energía almacenada se denomina amortiguamiento histerético.

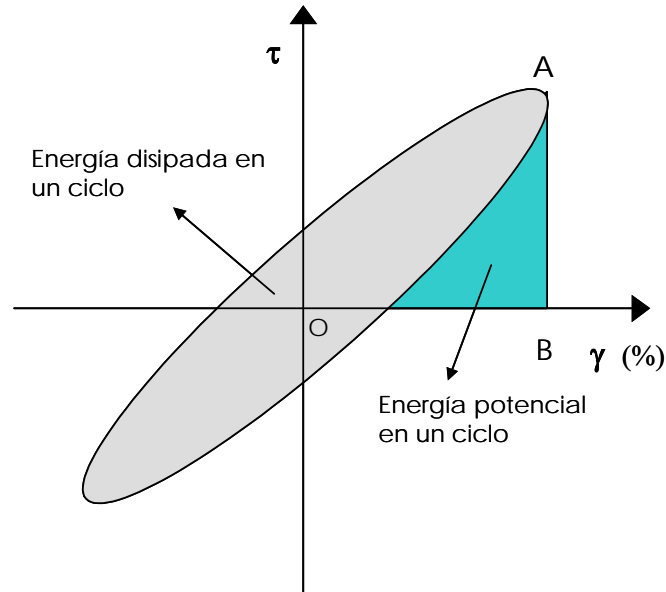


Fig 3.15 Curva esfuerzo-deformación de un ensayo cíclico

El amortiguamiento se determina con la ecuación que se muestra a continuación:

$$\lambda = \frac{\text{Área dentro del ciclo de histéresis}}{4\pi \text{ Área OAB}} \quad 3.3$$

El amortiguamiento proporciona una medida de las características disipadoras de energía del suelo, éste resulta principalmente de efectos friccionantes no lineales, conocidos como histéresis, al deslizar entre si las partículas mineralógicas. La energía de deformación liberada durante la descarga es inferior a la almacenada durante la carga. Por lo tanto, el deslizamiento de partículas individuales en una masa de suelo afecta la cantidad de energía absorbida. A mayor deslizamiento (deformación) en el suelo (sin alcanzar la falla), más alto será el amortiguamiento. Esta propiedad se representa usualmente por el área dentro del ciclo de histéresis., como se indica en la figura 3.9.

El amortiguamiento del suelo se determina usualmente en el laboratorio a partir de los resultados de ensayos cíclicos. Es un hecho experimental que la capacidad de los suelos para disipar energía depende primordialmente de la magnitud de la deformación inducida. Al incrementarse ésta, el amortiguamiento aumenta como se indica en la fig 3.16, donde se muestran los resultados de ensayos triaxiales cíclicos en la arcilla de la ciudad de México para dos presiones de consolidación. Se puede observar que el efecto del esfuerzo de consolidación es despreciable. Por otro lado, sobre todo para las deformaciones angulares mayores a 0.9%, como se observa en la figura 3.17 donde se comparan los resultados de dos ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras de arcilla de la ciudad de México, consolidadas a igual esfuerzo octaédrico, pero una siguiendo una trayectoria isotropica y la otra anisotropica.

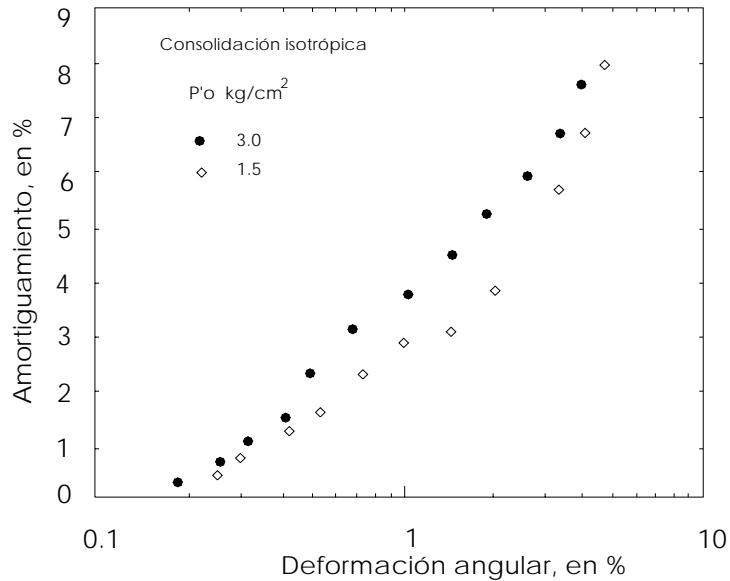


Fig 3.16 Relación de amortiguamiento, consolidación isotrópica (Taboada, 1989)

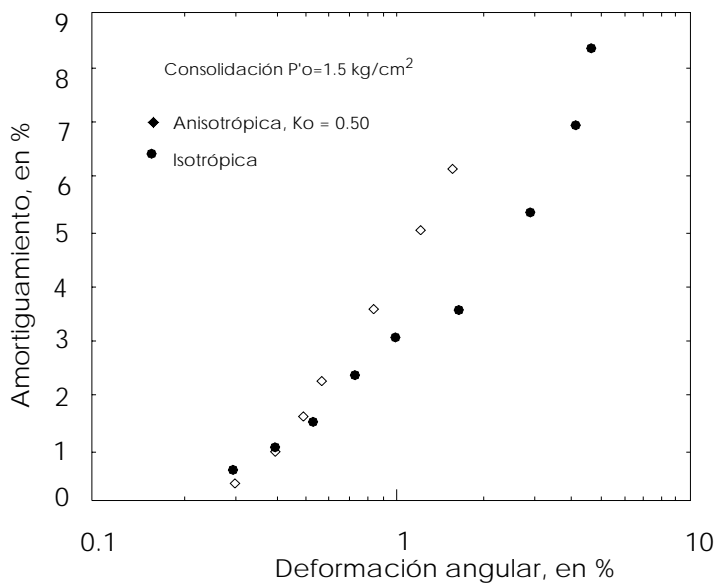


Fig 3.17 Efecto del tipo de consolidación en el amortiguamiento (Taboada, 1989)

3.2.4 Modelación numérica de la relación λ - γ

Lazan (1968), teóricamente mostró que la forma de variación del amortiguamiento en materiales elastoplásticos y asumiendo el comportamiento tipo Massing puede relacionarse con el módulo de rigidez del material. Similarmente Hardin y Drnevich (1972) propusieron una simple, pero acertada relación entre el amortiguamiento y el módulo de rigidez del suelo, donde:

$$\lambda = \lambda_{m\acute{a}x} \left(1 - \frac{G}{G_{m\acute{a}x}} \right) \quad 3.4$$

donde: $G_{m\acute{a}x}$ es el máximo valor de G , el cual es obtenido para deformación angular del orden de 0.0001%

De la ecuación 3.3 tenemos que

$$G = G_{m\acute{a}x} [1 - H(\gamma)] \quad 3.5$$

sustituyendo $G/G_{m\acute{a}x}$ en la ecuación anterior

$$\lambda = \lambda_{m\acute{a}x} H(\lambda) \quad 3.6$$

donde: $\lambda_{m\acute{a}x}$ es definido como el valor máximo de λ que el suelo puede tener antes de llegar a la falla bajo carga dinámica

Estableciendo las condiciones de frontera para deformaciones angulares pequeñas: $H(\gamma) \rightarrow 0$ y $\lambda = \lambda_{m\acute{i}n}$; y para deformaciones angulares altas: $H(\gamma) \rightarrow 1$ y $\lambda = \lambda_{m\acute{a}x}$ (Romo, 1995).

La ecuación 3.5 queda expresada de la siguiente manera.

$$\lambda = (\lambda_{m\acute{a}x} - \lambda_{m\acute{i}n}) H(\gamma) + \lambda_{m\acute{i}n} \quad 3.7$$

donde: $\lambda_{m\acute{i}n}$ es el valor del amortiguamiento que se genera para deformaciones angulares pequeñas.

3.3 Parámetros que afecta las propiedades dinámicas de las arcillas

Las propiedades dinámicas del suelo, junto con otros factores como las características de las ondas sísmicas, la topografía en la superficie, la estratigrafía del sitio y la ubicación de un estrato duro o roca en el fondo, juegan un papel esencial en la respuesta sísmica del sitio, es decir la respuesta de campo libre.

El conocimiento de las propiedades dinámicas es básico para describir el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos sometidos a cargas dinámicas (cargas que varían con el tiempo). Las propiedades dinámicas del suelo, representadas por el módulo de rigidez, G , y el amortiguamiento, λ , que rigen principalmente la respuesta sísmica de un depósito de suelo, que tienen un comportamiento no lineal: varía con la deformación angular, γ .

Dobry y Vucetic, (1987) estudiaron los efectos de la relación de preconsolidación, OCR, y del índice de plasticidad, IP, sobre $G_{m\acute{a}x}$, $G/G_{m\acute{a}x}$, y γ .

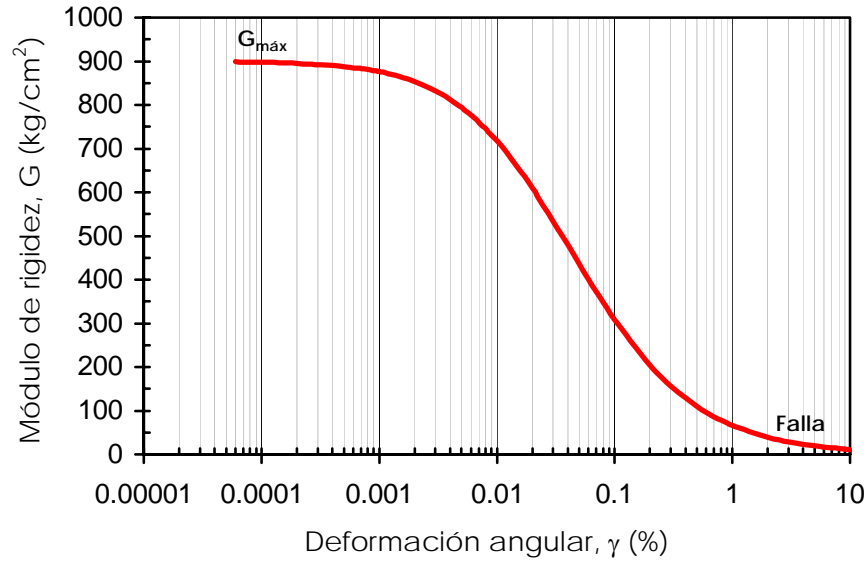
Los resultados que obtuvieron se resume en la tabla 3.1. Las conclusiones que se presentan son derivadas de un gran numero de ensayos en suelos marinos, obtenidos principalmente de las costas de Venezuela y arcillas terrestres.

Tabla 3.1 Factores que afectan la variación cualitativa de las propiedades dinámicas y amortiguamiento en las arcillas normalmente consolidadas y ligeramente preconsolidadas (Dobry y Vucetic, 1987)

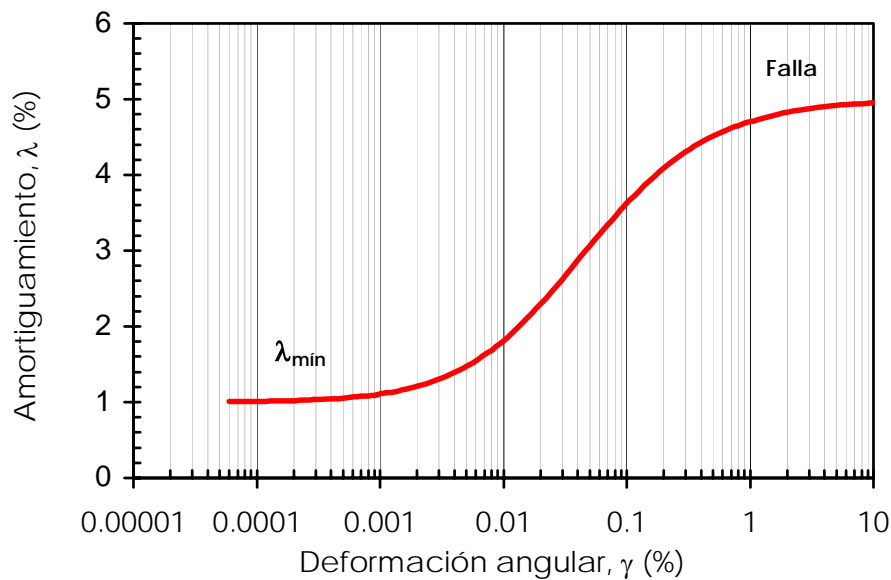
Factor	$G_{m\acute{a}x}$	$G/G_{m\acute{a}x}$	λ
Esfuerzo de confinamiento, $\sigma'c$	Aumenta al crecer $\sigma'c$	Permanece constante o crece con $\sigma'c$	Permanece constante o aumenta con $\sigma'c$
Relación de vacíos, e	Disminuye al crecer, e	Aumenta al crecer, e	Disminuye al crecer, e
Edad geológica, t	Aumenta al crecer, t	Puede aumentar al crecer, t	Disminuye al crecer, t
Cementación, c	Aumenta al crecer, c	Puede crecer al crecer, c	Puede disminuir al crecer, c
Grado de preconsolidación, OCR	Aumenta al crecer, OCR	No afecta	No afecta
Índice de plasticidad, I_p	Aumenta al crecer I_p si $OCR > 1$ Casi permanece constante si $OCR = 1$	Aumenta al crecer, I_p	Disminuye al crecer, I_p
Deformación cíclica γ_c	-----	Disminuye al decrecer, γ_c	Aumenta al crecer, γ_c
Relación de deformación, γ (frecuencia de carga cíclica)	Aumenta al crecer, γ	<ul style="list-style-type: none"> o G crece con γ o $G/G_{m\acute{a}x}$, probablemente no afecte si G y $G_{m\acute{a}x}$, son medidos con el mismo γ 	Permanece constante ó puede crecer con γ
Número de ciclos de carga, N	Disminuye después de N ciclos para grandes γ_c , pero se recupera después con el tiempo	Decrece después de N ciclos para grandes γ_c ($G_{m\acute{a}x}$ medido antes de N ciclos)	No es significativo para moderados γ_c y número de ciclos N

3.3.1 Efecto del nivel de deformación angular.

El comportamiento dinámico de las arcillas bajo carga cíclica depende del nivel de deformación inducido, a pequeñas deformaciones la respuesta es lineal o casi lineal, y a grandes deformaciones es ampliamente no lineal como se muestra en la figura 3.18. La deformación en la cual ocurre la transición entre el comportamiento a pequeñas y grandes deformaciones, depende del tipo y plasticidad de la arcilla. Los resultados de investigaciones experimentales han señalado que el módulo de rigidez y amortiguamiento dependen del nivel de deformación que se impone al suelo durante los ensayos y los equipos de laboratorio utilizados.



a) Curva de degradación del módulo de rigidez



b) Incremento del amortiguamiento

Fig 3.18 Variación del amortiguamiento con la deformación angular

3.3.2 Efecto del esfuerzo efectivo octaédrico y tipo de consolidación

El valor del módulo de rigidez depende principalmente de la magnitud de la deformación angular cíclica inducida. Como se muestra en figura 3.19, al aumentar la deformación disminuye la rigidez de la arcilla. Se puede apreciar que el módulo de la arcilla también depende del tipo de consolidación. Para un mismo esfuerzo efectivo octaédrico, las muestras consolidadas anisotrópicas muestran módulos de rigidez mayores que en condiciones de consolidación isotrópica. Por otro lado, al incrementar el valor del esfuerzo efectivo de consolidación, P'_o (isotrópica o anisotrópicamente), el valor del módulo de rigidez aumenta.

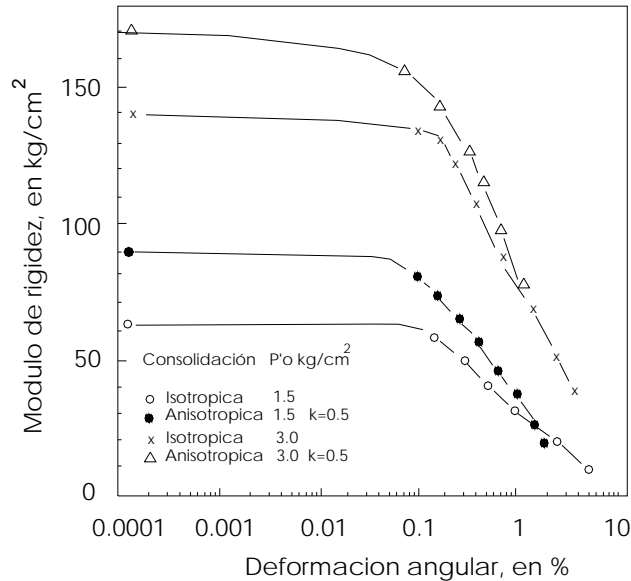


Fig 3.19 Efecto del tipo de consolidación y esfuerzo efectivo octaédrico en el módulo de rigidez, (Modificada de Taboada, 1989)

3.3.3 Efecto de la relación de vacíos

La tendencia derivada de las curvas $G/G_{m\acute{a}x}$ y λ con la relación de vacíos del suelo e , han indicado que es similar al efecto de índice de plasticidad I_p ; cuando e se incrementa, esto es evidente, puesto que las arcillas el I_p condicionan el valor de e , cuando el material esta normalmente consolidado, la curva $G/G_{m\acute{a}x}$, tiende a moverse hacia arriba, mientras que la curva λ , va hacia abajo. La influencia de e sobre $G/G_{m\acute{a}x}$ fue originalmente propuesto por Lodde y Stokoe (1982).

3.3.4 Efecto del grado de preconsolidación

Estudios enfocados directamente a evaluar el efecto del OCR en las curvas $G/G_{m\acute{a}x}$ y λ versus γ , conducidos por Koutsoftas y Fisher (1980) y Kokusho et al. (1982), ambos resultados demostraron que para grandes OCRs, este prácticamente no tiene ningún efecto en la posición de las curvas $G/G_{m\acute{a}x}$ y λ versus γ . La no dependencia de estos parámetros en el OCR, fue también verificada experimentalmente y utilizada en el comportamiento dinámico para carga cíclica por Dobry y Vucetic, 1982. Sin embargo, es importante señalar que el OCR sí afecta al $G_{m\acute{a}x}$.

3.3.5 Efecto de la edad geológica.

Anderson y Stokoe (1978) y Kokusho et al. (1982), investigaron el efecto del tiempo de confinamiento (edad geológica) en $G_{m\acute{a}x}$ encontraron que la influencia de este factor está correlacionado con el $G_{m\acute{a}x}$, al incrementar este efecto incrementa el $G_{m\acute{a}x}$. Es decir, $G_{m\acute{a}x}$, se incrementa más con el tiempo en arcillas de alta plasticidad que arcillas de baja plasticidad, siempre y cuando con OCR mayores a 1. Mientras que el amortiguamiento decrece con el tiempo de confinamiento, esta es la razón del porqué los depósitos más viejos tienden a ser mas rígidos (valores altos de $G_{m\acute{a}x}$ y V_s) y este efecto debe ser

considerado cuando se predicen valores de campo de $G_{m\acute{a}x.}$ y V_s de pruebas de laboratorio. Este efecto, también está presente en el módulo al corte secante en grandes deformaciones cíclicas.

3.3.6 Efecto del número de ciclos

La rigidez de los suelos cohesivos saturados decrece con el número de ciclos cuando está sujeta a carga cíclica no drenada. Esta degradación en el módulo G es acompañado con el rompimiento del enlace de las partículas y aumento en la presión de poro. La degradación de la relación del modulo de rigidez con el número de ciclos para una deformación cíclica dada decrece con el I_p . Por otro lado, la relación de amortiguamiento no es afectado con el número de ciclos para los mismos suelos cohesivos.

3.4 Equipo de laboratorio dinámico

Para determinar las propiedades dinámicas de los suelos en el laboratorio se han desarrollado varias técnicas que inducen deformaciones de diversas magnitudes

Los ensayos más utilizados son:

- 1.- Columna resonante CR
- 2.- Triaxial cíclica TXC

3.4.1 Columna resonante (CR)

El equipo dinámico de columna resonante se utiliza para determinar el módulo de rigidez al cortante, G , y el amortiguamiento, λ , a deformaciones, γ , desde 0.00001% hasta 0.04% aproximadamente. Permite ensayar probetas de suelos granulares o friccionantes.

La automatización del equipo triaxial dinámico de columna resonante consta de una computadora con una tarjeta de adquisición de datos, una serie de acondicionadores de señal, un sistema de bobinas e imanes colocados dentro de la cámara triaxial y un programa de manejo automático y captura de datos. El programa está dividido en tres módulos: operación, donde se verifican las señales de cada uno de los sensores en cualquier etapa de la prueba, se diseña y ejecuta el ensayo; cálculo, en el cual se obtienen los parámetros dinámicos: módulo de rigidez al cortante dinámico, G , amortiguamiento, λ y deformación angular, γ y calibración, que se utiliza para calcular las constantes de cada uno de los sensores instalados.

Se le aplica a un espécimen cilíndrico empotrado en la base una torsión con una fuerza en forma de señal periódica senoidal con una amplitud y frecuencia definida. Con acelerómetro colocado en la parte exterior de la probeta se mide la respuesta de la muestra.

Se mantiene constante la amplitud de la fuerza y se va incrementando la frecuencia en un valor Δf , y para incremento se registra la aceleración de la respuesta. Lo que se obtiene, después de aplicar un número importante de incrementos de frecuencia, es

una curva de aceleración-frecuencia, denominada curva de aceleraciones totales o curva de respuesta bajo vibración forzada.

El equipo de columna resonante se utiliza para determinar el modulo de rigidez al cortante G y la relación de amortiguamiento λ , a pequeñas deformaciones ($10^{-5}\%$ a $10^{-2}\%$), figura 3.20.

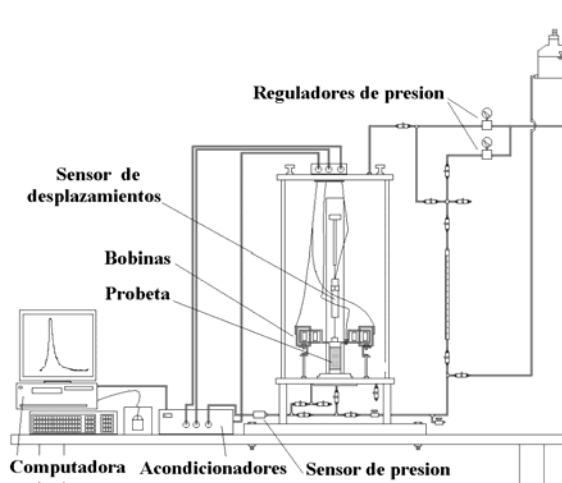


Fig 3.20 Esquema del equipo dinámico de columna resonante, del Instituto de Ingeniería, UNAM

El ensaye se realiza con una probeta cilíndrica de suelo de 3.5 cm de diámetro y 8.5 cm de altura, bajo vibración torsional. Esto se logra al aplicar una fuerza de torsión y se hace variar la frecuencia de excitación, hasta alcanzar la frecuencia de resonancia.

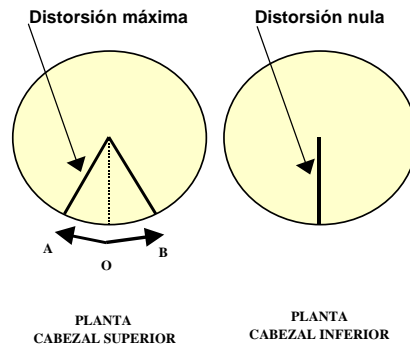
El sistema está compuesta por una computadora que tiene integrada una tarjeta de adquisición de datos modelo PC MIO 16Ex10 de National Instruments, un conjunto de acondicionadores de señal y la cámara en la que se coloca la probeta de suelos. Este equipo cuenta con tres sensores:

- Uno de desplazamiento, el cual mide el desplazamiento axial de la probeta durante el ensaye
- Uno de presión, para registrar los esfuerzos que se aplican al espécimen en las etapas previas del ensaye (confinante y contrapresión), y la presión de poro que se genera en la etapa de prueba
- Un acelerómetro, que mide la aceleración del sistema móvil

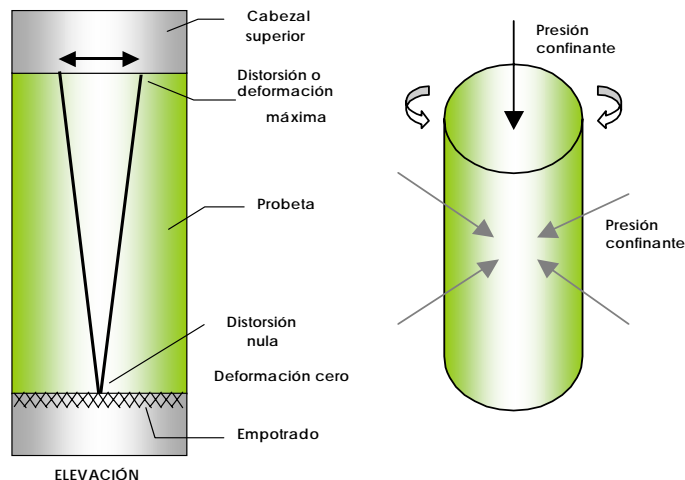
En la parte superior de la probeta la distorsión es aplicada por el cabezal superior, que esta unido al sistema móvil y a este lo mueven una serie de imanes y bobinas a los que llega desde la computadora una señal eléctrica que induce al sistema un movimiento periódico seneoidal.

Experimentalmente se observa que el cabezal se mueve desde un punto central O hasta los puntos A o B, sentido positivo o negativo del movimiento, respectivamente, figura 3.21. En los puntos A y B se invierte la dirección en el movimiento, tal que en estos puntos la aceleración es cero, mientras que en cualquier otro instante la aceleración es diferente de cero, con el sentido positivo o negativo. Cuando el cabezal pasa por el punto O, la

aceleración es máxima, en el sentido positivo o negativo dependiendo de la dirección que se mueva. En términos generales, las señales de desplazamiento y aceleración vs tiempo tienen la misma frecuencia.



a) Distorsión de la probeta en la parte superior y en la base



a) Deformaciones angulares en la probeta

b) Forma de aplicar la torsión

b) Distorsión de la probeta durante el ensaye

Fig 3.21 Esquema de deformación de la probeta, en la columna resonante

Descripción de la prueba. Una vez que se haya saturado la probeta, se somete a una condición de esfuerzo efectivo de consolidación isotrópica, aplicando esfuerzos de confinamiento, σ_c , y contrapresión, σ_{cp} ; como se muestra en la figura 3.22.

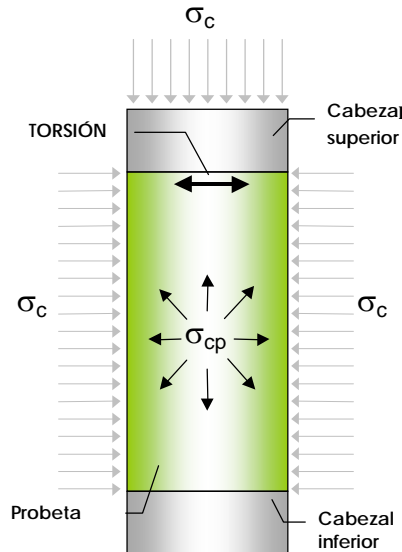


Fig 3.22 Condiciones de esfuerzos en la etapa de ensaye

Durante la etapa de ensayos se aplica una fuerza de torsión F , en la parte superior del espécimen mientras que su base se encuentra empotrada (figura 3.21b), se registra la aceleración de respuesta, a , con el acelerómetro montado en el sistema móvil, la cual dependerá de la rigidez del material, ensayado; entre más rígido es este, menor será la aceleración de respuesta. Con la fuerza F se excita la probeta a una frecuencia, definida como frecuencia inicial, f_i , y se registra la aceleración de respuesta, posteriormente se incrementa la frecuencia en valores Δf constantes, y en cada uno de ellos se registra la aceleración, hasta llegar a una frecuencia final, f_f .

A estas lecturas de aceleración desde una frecuencia f_i hasta f_f con incrementos Δf se llama barrido de frecuencias. Al terminar cada barrido de frecuencias se incrementa la fuerza de torsión en valores ΔF , de manera que al final del ensaye se tendrá una serie de barridos de frecuencia, donde la fuerza de torsión va incrementándose entre cada uno de ellos.

De la señal experimental, aceleración *vs* tiempo, se obtiene el espectro de aceleraciones, del cual se determina la frecuencia y la amplitud pico de aceleración de respuesta. Para cada una de las amplitudes de torsión aplicadas y con el barrido de frecuencias se forma la curva de aceleraciones *vs* frecuencia, como se muestra en figura 3.23, en esta figura se presenta una serie de barridos de frecuencia; a cada una de estas curvas se le conoce como curva de respuesta o de aceleraciones totales bajo vibración forzada y cada una de ellas corresponde a una fuerza de torsión, F . Al incrementarse la fuerza F , se incrementa la aceleración máxima, $a_{m\acute{a}x}$ y se reduce la frecuencia en la que esta aceleración se presenta, llamada frecuencia de resonancia, f_0 . Este decremento en f_0 significa que se están induciendo deformaciones que causan efectos no lineales en la probeta. Estos efectos se observan en las curvas G *vs* γ .

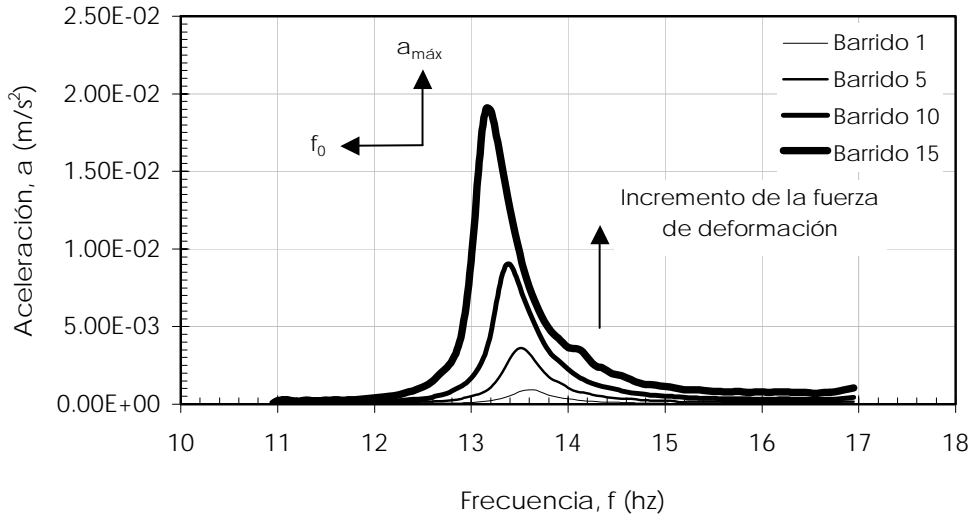


Fig 3.23 Variación de las curvas de aceleraciones totales con el incremento de la fuerza de torsión

Cálculo de parámetros. De cada curva de aceleraciones totales se obtiene la aceleración máxima, $a_{máx}$, la frecuencia de resonancia, f_0 , y las frecuencias f_1 y f_2 , correspondientes a la aceleración $\frac{a_{máx}}{\sqrt{2}}$, como se muestra en la figura 3.24. Con estos valores se determina los parámetros dinámicos.

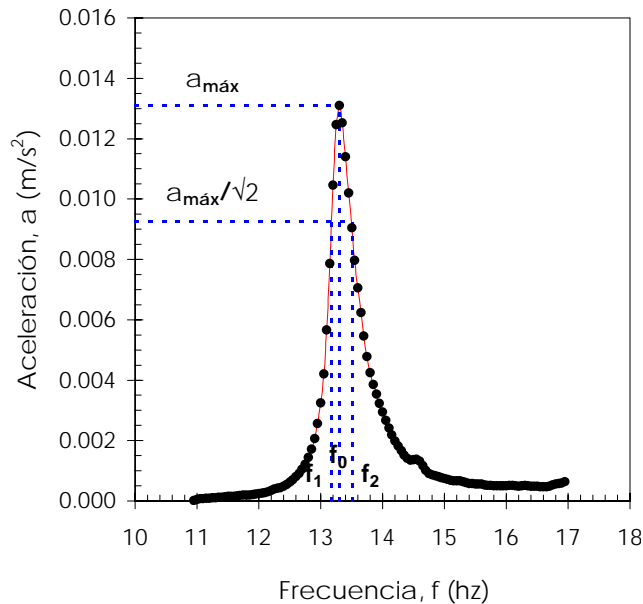


Fig 3.24 Curva experimental de aceleraciones totales

Con los valores de f_0 , la longitud de la muestra, L , y el valor de β calculado a partir de los momentos polares de inercia de la muestra, I_m , y del sistema móvil, I_s , se puede determinar la velocidad de cortante, de la siguiente manera:

$$V_s = \frac{2 \pi f_n L}{\beta} \quad 3.8$$

donde:

V_s	velocidad de corte, en m/s
π	3.1416
f_o	frecuencia natural o de resonancia de la muestra, en hz
L	longitud de la muestra, en m
β	valor obtenido de la expresión $\beta \tan \beta = I_m / I_s$ (β en radianes)
I_m	momento polar de inercia de la masa de la muestra, en kg-m-s ²
I_s	momento polar de inercia de masa del sistema móvil de la columna resonante, en kg-m-s ²

Considerando que; $V_s^2 = \frac{G}{\rho}$ se tiene que

$$G = \rho V_s^2 \quad 3.9$$

donde:

G	módulo de rigidez dinámico, en kg/cm ²
ρ	densidad de masa de la muestra, $\rho = \gamma/g$

La deformación angular queda definida por la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{1}{3} \frac{\theta}{L} D \quad 3.10$$

donde:

γ	deformación angular, en %
θ	distorsión angular
L	longitud de la muestra, en m
D	es el diámetro de la probeta, en m

La aceleración inicial media, a , y la rotación en la parte superior de la probeta se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$a = \ddot{\theta} r \quad 3.11$$

donde:

$\ddot{\theta}$	aceleración angular
r	distancia del centro de gravedad del acelerómetro al centro de la muestra, en m

si se supone una respuesta senoidal de la muestra, se tiene que:

$$\theta = \frac{\ddot{\theta}}{(2 \pi f)^2} = \frac{\ddot{\theta}}{4 \pi^2 f^2} \quad 3.12$$

por tanto,

$$\ddot{\theta} = 4 \theta \pi^2 f^2 \quad 3.13$$

sustituyendo la expresión 3.13 en 3.11

$$a = 4 \theta \pi^2 f^2 r \quad 3.14$$

despejando θ

$$\theta = \frac{a}{4 \pi^2 f^2 r} \quad 3.15$$

sustituyendo la expresión 3.15 en 3.10, obtenemos

$$\gamma = \left(\frac{1}{3} \frac{1}{4 \pi^2 r} \right) \frac{Da}{L f^2} \quad 3.16$$

Cuando $a = a_{\text{máx}} \Rightarrow f = f_0$, entonces,

$$\gamma = \left(\frac{1}{12 \pi^2 r} \right) \frac{Da_{\text{máx}}}{L f_0^2} \quad 3.17$$

Los valores de r para las columnas resonantes 1 y 2 son, respectivamente.

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.0620 \text{ m} \\ r_2 &= 0.0651 \text{ m} \end{aligned}$$

por tanto, cuando $a = a_{\text{máx}}$, la deformación angular queda expresada como sigue, para las columnas 1, 2, respectivamente.

$$\gamma_1 = 0.1362 \frac{Da_{\text{máx}}}{L f_0^2} \quad 3.18$$

$$\gamma_2 = 0.1297 \frac{Da_{\text{máx}}}{L f_0^2} \quad 3.19$$

donde:

- γ_1 deformación angular para la columna resonante 1, en %
- γ_2 deformación angular para la columna resonante 2, en %

Para el cálculo del amortiguamiento se propuso el método basado en la curva de aceleraciones totales (aceleración vs frecuencia). El método utiliza un ancho de la curva de respuesta, el cual está definido por las frecuencias en las que se tiene la mitad de la potencia máxima de respuesta, f_1 y f_2 , las cuales ocurren cuando la aceleración es $\frac{a_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$ (figura 3.24).

La relación de amortiguamiento se calcula con la siguiente expresión:

$$\lambda = \left(\frac{f_2 - f_1}{2 f_n} \right) 100 \quad 3.20$$

donde: λ relación de amortiguamiento, se expresa en %.

3.4.2 Triaxial cíclica (TXC)

El ensaye triaxial cíclico consiste en colocar una muestra de suelo de 3.5 cm de diámetro y de 8.6 cm de altura, en una cámara triaxial y consolidarla a la relación de esfuerzos principales deseada. El equipo de triaxial cíclica se utiliza para determinar el módulo de rigidez al cortante, G , y el amortiguamiento, λ , a deformaciones angulares, γ , de 0.1% aproximadamente hasta 10%.

Se aplica una deformación axial cíclica (deformación controlada), con una forma de onda conocida (normalmente senoidal) a la frecuencia deseada. Para medir la presión se utilizaron dos reguladores de presión, uno para dar presión confinante y otro para la contrapresión. El medio utilizado para transmitir la presión confinante fue agua. El drenaje de la muestra se efectúa en ambos extremos por medio de piedras porosas, lateralmente se colocó papel filtro para acelerar el proceso de consolidación. Los drenes de la base y la tapa de la muestra se comunica a una bureta.

El equipo triaxial SBEL (Structural Behavior Laboratories) sirve para hacer pruebas triaxiales estáticas y dinámicas. Consta básicamente de tres elementos:

1. Sistema neumático (aplicación de carga)
2. Sistema de aplicación de presión (confinamiento y contrapresión)
3. Sistema automatizado del equipo, captura y procesamiento de datos

1 Sistema neumático

La carga que se aplica a la probeta se hace mediante un sistema neumático con presión de aire, que consta de una servoválvula que se conecta a un pistón el cual, según la presión de entrada y de salida, se mueve en un sentido u otro axialmente. El equipo opera a deformación controlada, con un sensor de desplazamiento (LVDT) instalado sobre el pistón, en el exterior de la cámara.

2 Sistema de aplicación de presión. Para aplicar las presiones a la probeta se hace uso de dos reguladores de presión, uno para presión confinante y otro para contrapresión, por

medio de un conjunto de reguladores se hace llegar a dos transductores para cuantificar la presión que pasa por los reguladores. Cuando la presión medida es la deseada, esta queda lista para hacer aplicada a la probeta.

Para la aplicación de la contrapresión se utiliza una bureta que sirve como interfaz (aire-agua) entre la presión de aire que sale de los reguladores y el agua en la probeta.

3 Sistema automatizado del equipo, captura y procesamiento de datos. Este sistema, formado por el equipo triaxial SBEL, una computadora con una tarjeta de adquisición de datos y un conjunto de transductores, permite controlar automáticamente el equipo, diseñar, adquirir y procesar diferentes tipos de pruebas.

- a) Prueba estática. Aplica un patrón de carga en rampa, es decir, carga de deformación a una velocidad de aplicación constante, con el tiempo de duración, deformación inicial y final definidos por el usuario
- b) Prueba dinámica senoidal. Aplica como excitación, en carga o deformación controlada, un patrón senoidal en el que varía la amplitud de la señal y número de ciclos

Después de que se diseña el ensayo, se registran las características geométricas de la probeta y se ejecuta la prueba, por medio de una tarjeta de adquisición de datos se controla automáticamente el equipo durante el ensayo y de forma simultánea, se registran las señales obtenidas en los transductores instalados.

Al terminar el ensayo se trabaja en el módulo de reporte, el cual se procesa la información y se obtienen los parámetros estáticos o dinámicos del material, así como la lectura de cada transductor.

Los transductores instalados en la cámara triaxial SBEL son los siguientes:

- Una celda de carga
- Un LVDT para medir los desplazamientos del espécimen
- Dos transductores de presión, uno donde se registra la presión de poro en la base de la bureta, en caso de ser prueba no drenada y el otro para medir la presión de confinamiento
- Un transductor de presión diferencial para registrar los cambios volumétricos, en casos de pruebas no drenadas

Descripción de la prueba:

Primero la probeta se somete a una condición de esfuerzo efectivo de consolidación determinado, aplicando esfuerzos de confinamiento σ_c y contrapresión σ_{cp} . El equipo permite aplicar condiciones de consolidación isotrópica, figura 3.25.

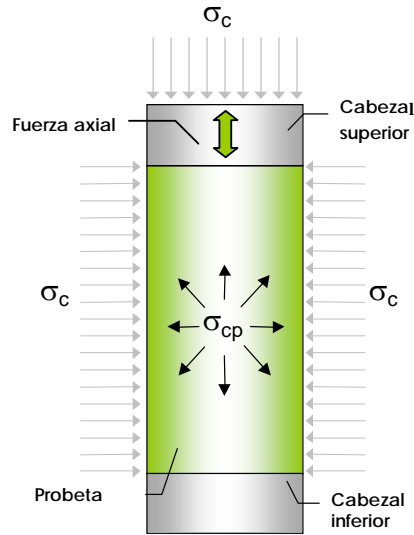


Figura 3.25 Condiciones de esfuerzos en la etapa de ensaye

Cálculo de parámetros

- Módulo de elasticidad, E (Kg/cm²)
- Módulo de rigidez al cortante dinámico, G (Kg/cm²)
- Esfuerzo cortante, τ (Kg/cm²)
- Deformación angular, γ (%)
- Relación de amortiguamiento, λ (%)

Módulo de elasticidad

Se obtiene de la expresión

$$E = \frac{\sigma d}{\varepsilon a} \tag{3.21}$$

donde:

$\sigma d = \sigma_1 - \sigma_3$	El fuerza desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) definido por la ecuación para un incremento de carga
$\varepsilon a = \delta / h$	Deformación axial unitaria definida por la ecuación para un incremento de carga (figura 3.26)
σ_1	Esfuerzo principal mayor aplicado a la probeta del suelo
σ_3	Esfuerzo principal menor aplicado a la probeta de suelo
δ	Desplazamiento axial máximo registrado en la probeta del suelo
H	Altura inicial de la probeta

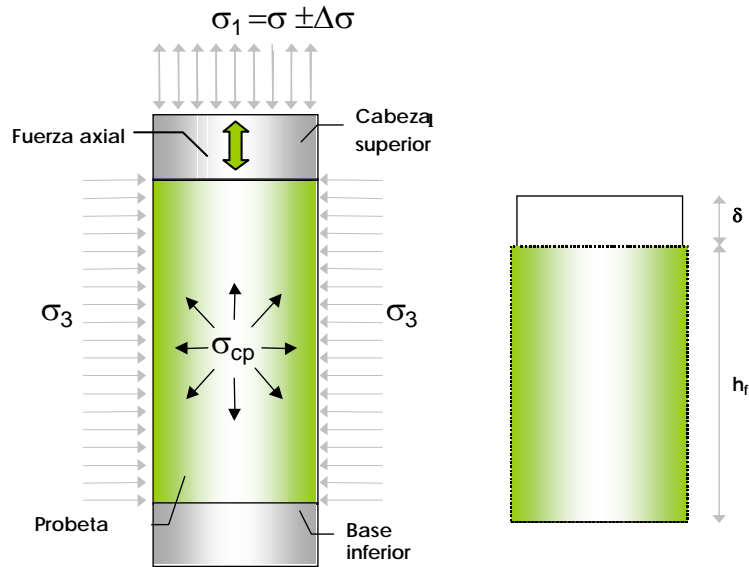


Fig 3.26 Esfuerzos aplicados y deformaciones registradas en la probeta de suelo

Módulo de rigidez al cortante

Se obtiene con la expresión:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad 3.22$$

donde:

E Módulo de elasticidad dinámico para un incremento de carga
 ν Relación de Poisson

Esfuerzo cortante

$$\tau = \frac{q}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad 3.23$$

Deformación angular

Se expresa como:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad 3.24$$

donde:

- τ esfuerzo cortante para un incremento de carga
- G módulo de rigidez al cortante (para un incremento de carga)

Es importante mencionar que la mayoría de los suelos bajo carga cíclica exhiben relaciones esfuerzo-deformación características para un ciclo completo de carga y descarga. Debido a la forma de las curvas, el módulo de rigidez para un ciclo de carga se determina del ciclo de histéresis, como se indicó anteriormente.

Los equipos de columna resonante y triaxial cíclica son complementarios, el de columna resonante presenta solamente deformaciones angulares pequeñas, como ya se menciona y el de triaxial cíclica presenta deformaciones mayores del orden de 1.0% hasta 10%.

4. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL COMPLEJO KU-MAOOLB-ZAAP

Con una inversión de 42 mil 200 millones de pesos, PEMEX Exploración y Producción desarrollará, durante los próximos ocho años, el Proyecto Ku-Maloob-Zaap, en la Sonda de Campeche, con objeto de mantener la plataforma de producción de crudo pesado, satisfacer las necesidades futuras en el mercado nacional y cumplir los compromisos de México en el exterior, (PEMEX, 2001) boletín 244, prensa.

Del total de la inversión, el 67 por ciento se destinará a obras estratégicas, 20 por ciento a proyectos operacionales mantenimiento de instalaciones, 11 por ciento, corresponde a intereses del capital financiable y el resto a nuevo presupuesto estratégico.

El activo Ku-Maloob-Zaap está aproximadamente a 105 kilómetros al noroeste de ciudad del Carmen, frente a los estados de Tabasco y Campeche, y para su desarrollo la Región Marina Noroeste de PEMEX Exploración y Producción contempla perforación 82 pozos, instalar 17 plataformas y construir 32 ductos, figura 4.1.

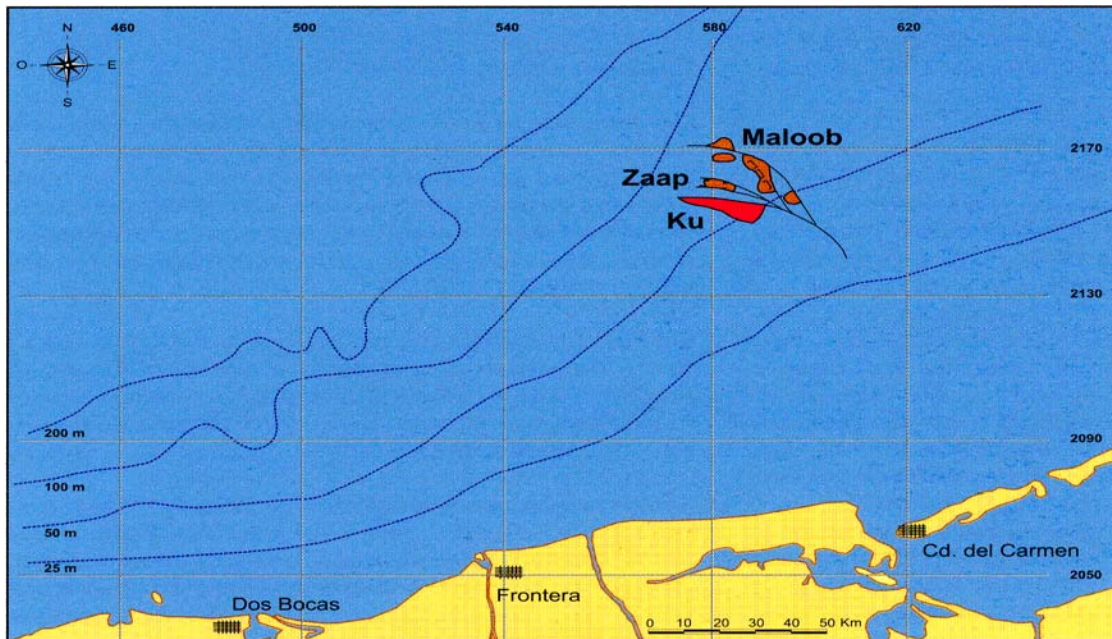


Fig 4.1. El complejo Ku-Maloob-Zaap se encuentra a 105 kilómetros al noroeste de Ciudad del Carmen (PEMEX, 1999)

Del total de pozos a perforar, 78 serán de producción y cuatro inyectores de nitrógeno; siete de las plataformas serán de perforación, cuatro de producción y una de enlace/compresión, además se instalarán cuatro plataformas habitacionales y una de telecomunicaciones, así como cinco oleogasoductos con una extensión de 166 kilómetros, 20 gasoductos, tres nitrogenoductos y cuatro oleoductos.

Asimismo, la obra contempla otros sistemas principales compuestos por ocho estaciones de separación, cinco estaciones de bombeo y cinco estaciones de compresión.

Con esta obras, se estima que en el año 2011 el desarrollo del Proyecto Ku-Maloob-Zaap alcanzará su máximo de producción de crudo Maya, al aportar un total de 800 mil barriles diarios, cifra que contrasta con los 263 mil barriles diarios que se extraen actualmente.

Respecto a la producción de gas asociado, actualmente este activo aporta una producción promedio por día de 108 millones de pies cúbicos diarios y se estima que para el año 2011, se alcanzarán los 282 millones de pies cúbicos por día.

4.1 Estratigrafía del sitio

En base a los estudios geofísicos realizados por Petróleos Mexicanos (PEMEX, 1999), esta constituido por sedimentos que van del Jurásico Superior Oxfordiano al Terciario. Los sedimentos del Oxfordiano son principalmente mudstone y wackestone de litoclastos, con interacciones de lutita, arena e intervalos de dolomita. Presenta además hacia la base horizontes de anhidritas y de sal. El Jurasico Superior Kimmeridgiano se compone por dolomita mesocristalina con intercalaciones de arcilla, carbonatos eolíticos recristalizados, ligeramente dolomitizados. En el Jurasico Superior Tithoniano se presenta la lutita negra calcárea y fosilífera, y lutita con intercalaciones de wackestone y mudstone.

El Cretácico inferior está compuesto por dolomía microcristalina así como por mudstone y wackestone de nanocónidos y tintínidos. En el Cretácico Medio predominan los carbonatos, principalmente mudstone a wackestone arcilloso y fracturado, dolomía microcristalina y nódulos aislados de pedernal. En el Cretácico Superior se encuentran brechas derivadas de calizas dolomitizadas, con cementante arcilloso y calcáreo.

El Terciario se encuentra representado por el Paleoceno Inferior, el cual se constituye de limolita ligeramente calcárea con interacciones de lutita y wackestone a packstone con intercalaciones de lutita. El Paleoceno Superior se compone de lutita clara bentonítica calcárea con fragmentos de pedernal y limolita ligeramente calcárea. En el Eoceno Inferior predominan las lutitas bentoníticas, ligeramente calcáreas, con intercalaciones de mudstone a wackestone. Para los sedimentos del Eoceno Medio las lutitas son de color café ligeramente calcáreas, y para el Eoceno Superior las lutitas son de color gris ligeramente calcáreas.

En el Oligoceno Inferior predomina la lutita gris verdosa, ligeramente calcárea, y en ocasiones piritizada. Las rocas del Oligoceno Medio se componen por lutitas gris bentonítica, suave y ligeramente calcárea, en tanto en el Oligoceno Superior las lutitas son bentoníticas y calcáreas.

Para el Mioceno Inferior los sedimentos se componen de lutita bentonítica y calcárea con piritita y micas diseminadas. En el Mioceno Medio se encuentran lutitas gris verdosas, ligeramente calcáreas, y arenosas, y en el Mioceno Superior son Lutitas gris, intercalaciones de arenisca de grano fino. Por último, el Pilo-Pleistoceno se compone de arcillas poco consolidadas y arenas.

4.2 Exploración geotécnica

4.1 Métodos Indirectos

Para el estudio de grandes estructuras y cuencas geológicas se han utilizado los métodos magnéticos, gravimétricos y sísmicos principalmente. Las pequeñas estructuras, estratos someros y suelos marino se exploran con métodos sísmicos de reflexión de alta resolución también llamados de perfilación.

Los programas de exploración geofísica para fines geotécnicos se llevan a cabo de manera integral con el sistema acústico multisensor que incluye los dispositivos empleados en la exploración del piso y del suelo marino y los que permiten explorar y medir el tirante de agua.

Con la finalidad de desplantar plataformas y tender ductos en la Sonda de Campeche, el estudio geofísico se ha orientado a los siguientes objetivos:

- Explorar la columna de agua medir su tirante
- Delinear la fisiografía y anomalías del fondo marino
- Conocer en forma general los estratos superficiales de suelos y accidentes en el mismo
- Definir la estratigrafía y estructura de los suelos y el lecho rocoso, identificando eventos que por su importancia representan riesgos

Estos objetivos representan de manera general un proyecto de plataformas o complejo industrial costa fuera. Estos pueden particularizarse dependiendo del tipo de obra o investigación por desarrollar.

En el primer punto se fija por la necesidad no solo de la medición directa del tirante de agua sino también para la detección de burbujas de gas.

En el segundo punto se fijan las tendencias en pendiente y la configuración de la superficie del piso marino permitiendo además localizar y delinear las anomalías naturales como cráteres, protuberancias coralinas, características líticas del suelo, canales y zonas de erosión; así como las artificiales provocadas por el hombre como: barcos hundidos, anclas, tuberías, brocales de pozos, etc.

En el tercer punto se fija para conocer las características estratigráficas y litológicas de los suelos someros, además de los accidentes estructurales como paleocanales, corales enterrados y discordancias al interpretar la concentración e intensidad de la señal en los registros sísmicos.

Por ultimo en el cuarto punto, se contempla la información hasta más halla de la interface suelo-roca o hasta los estratos resistentes que interaccionan con la cimentación de la plataforma, delineándose fundamentalmente fallas, plegamientos, fugas de gas y calificando litológicamente los diferentes estratos por la correlación de la intensidad del reflejo con la información obtenida mediante la exploración geotécnica directa.

4.2 Métodos Directos

Son una consecuencia de los estudios geofísicos, ya que generalmente son costosos, difíciles y tardados, aunque en algunos casos son complementarios de los indirectos para su calibración y confiabilidad en su interpretación. Estos estudios de métodos directos consisten en la exploración con recuperación de muestras representativas de los suelos para pruebas en el laboratorio con objeto de reducir los parámetros de diseño; la perforación con medición de resistencia al corte por medio de veletas y penetrómetros y sondas para la medición de la deformabilidad; las pruebas de carga directa al elemento de cimentación de los que se deducen los parámetros de resistencia del subsuelo, la observación mediante instrumentación del comportamiento de las estructuras en operación.

En la planeación de un estudio geotécnico debe revisarse la información existente del sitio de proyecto, considerando como aspectos básicos de decisión de programas los siguientes:

- Características de la estructura y cimentación, tomando factores y alternativas de diseño
- Meteorología y oceanografía del sitio, es decir, la información relativa a vientos, oleaje, corrientes, mareas y sismos del sitio del proyecto
- Estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos en el área. Esta información no solo sirve de base para la planeación del estudio geotécnico, sino que forma parte del mismo

Con base en la información anterior se elabora el programa del número, profundidad y tipo de sondeos, pruebas de laboratorio, análisis y presentación de resultados, así como recomendaciones necesarias para el diseño.

Los métodos de exploración y muestreo fuera de costa incluyen algunas técnicas convencionales de campo, ajustadas a las condiciones del trabajo costa fuera, como son: oleaje, viento, corrientes, tirantes de agua que obligan el uso de equipos de perforación más potente, mayores costos de operación y trabajo continuo.

El método de exploración marina usual es el adoptado de los estudios geotécnicos de campo denominado sondeos mixtos, que combinan el uso de la penetración estándar con la recuperación de muestras alteradas en suelos granulares y el muestreo de suelos arcillosos por medio de tubos especiales de pared delgada.

En la Sonda de Campeche el método de exploración y muestreo utilizado incluye también una medida de resistencia a la penetración que no es la estándar, sino que es un procedimiento adaptado al sistema de operación del cable guía (wire-line), en este procedimiento el tubo muestreador para suelos granulares tiene las mismas dimensiones que el penetrómetro estándar y es hincado por medio de un golpe de un martillo de 79.4 Kg en caída libre guiada de 1.52 m, tomando como medida de la resistencia a la penetración el número de golpes requeridos para hincar el tubo muestreador 61 cm dentro del suelo.

Para el muestreo de suelos cohesivos se ha empleado dos tipos de tubo de acero con paredes delgadas de diferente espesor: uno con diámetro exterior de 6.35 cm y el diámetro interior de 5.71 cm que se utiliza en los primeros metros para muestrear los suelos más blandos, el cual se le insertan cuatro tubos de fibra de vidrio de 12.7 cm de longitud y 5.4 cm de diámetro interior y el otro que se emplea en los estratos profundos más resistentes, que tienen 5.71 cm de diámetro exterior y 5.4 de diámetro interior.

El sistema de perforación utilizado en la exploración, como ya se indicó, es el denominado cable-guía. Este equipo emplea barras y brocas huecas que permiten el paso del barril muestreador, de las veletas o cualquier aparato de medición, en su interior sin mover el resto del equipo.

Cuando este equipo se opera en el mar, el lodo de perforación no se recircula y se pierde en el momento que sale por la boca del pozo en el piso marino, por esto es necesario reabastecerlo continuamente. El lodo empleado debe de tener las características de peso y consistencia adecuados para estabilizar las paredes de la perforación, sobre todo en suelos granulares, por lo que estas características deben de ser controladas en el sitio con viscosímetros del tipo del cono Marsh.

En la exploración geotécnica costa fuera la plataforma de operación es la cubierta de un chalán o de un barco. En la Sonda de Campeche se han utilizado barcos, por lo cual, el sistema cable-guía cuenta con un indicador de peso y con topes y amortiguadores para compensar el levantamiento del barco.

Dos tipos de barcos se han utilizado en la Sonda de Campeche: el de plataforma autoelevable (Jack up), para tirantes de agua, menores de 50 m y el normal, adaptado a los propósitos de exploración, con un agujero en la cubierta y en el casco, 50 m de eslora, 12 m de mangas, 5 m de calado y es de cubierta libre para acomodar las barras, torre y maquina de perforación, tolva para mezcla de lodos.

4.3 imágenes de rayos X de las muestras de tubo Shelby

En esta parte se presenta el desarrollo de las imágenes de rayos X que se le toman a las muestras de suelo marino, de la Sonda de Campeche, en particular del complejo Ku-Maloob-Zaap.

La técnica radiográfica de doble pared; en la cual se atraviesan los dos espesores de pared del tubo y el contenido de la muestra. Un número de nueve exposiciones se realizan para obtener la radiografía del 100% de la muestra. A lo largo del tubo se realizan 3 exposiciones, en total se dispone de 9 placas que permiten observar el interior del tubo en toda su periferia y sobre toda la longitud del tubo.

Un examen detallado de estas radiografías con rayos X hace posible evitar las regiones alteradas de la muestra. Las radiografías con rayos X ayudan a seleccionar las mejores muestras para ser usadas en las pruebas dinámicas de laboratorio, mediante la determinación de:

- La presencia de inclusiones dentro del espécimen (tales como fragmentos de concha, nódulos calcáreos, vetas de arena o limo y de depósitos de yeso)
- La existencia de fisuras, estratificaciones y posibles huecos, alteraciones durante el muestreo y la presencia de grietas por expansión debido a la liberación de esfuerzos

Una vez que se tiene el resultado del contenido de las muestras se determina el corte que se le realizara al tubo Shelby para los ensayos de laboratorio que se requieran, el corte que se le hace a la muestra es en un lugar donde no se encuentra fisuras, fracturas o huecos, también material como conchas, nódulos calcáreos, también se tiene que tener cuidado que no haya sido contaminado con cera la cual cubre al tubo en sus extremos.

Ya seleccionado donde se realizaría el corte, con objeto de producir la mínima alteración del material dentro del tubo, se procede a cortar el tramo con arco y segueta. Para limitar las vibraciones y movimientos del tubo éste se coloca sobre un riel y se sujeta por medio de un cinto. En las figuras 4.2 a 4.5 se presentan los rayos X tomadas a las muestras.

Sondeo P01X profundidad 10 metros

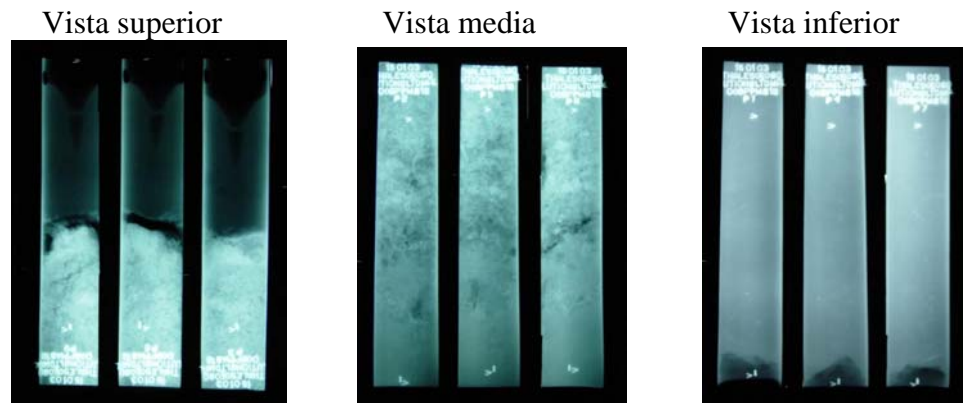


Fig 4.2 imagen de rayos X de muestra P01X

Sondeo P19 profundidad 18 metros

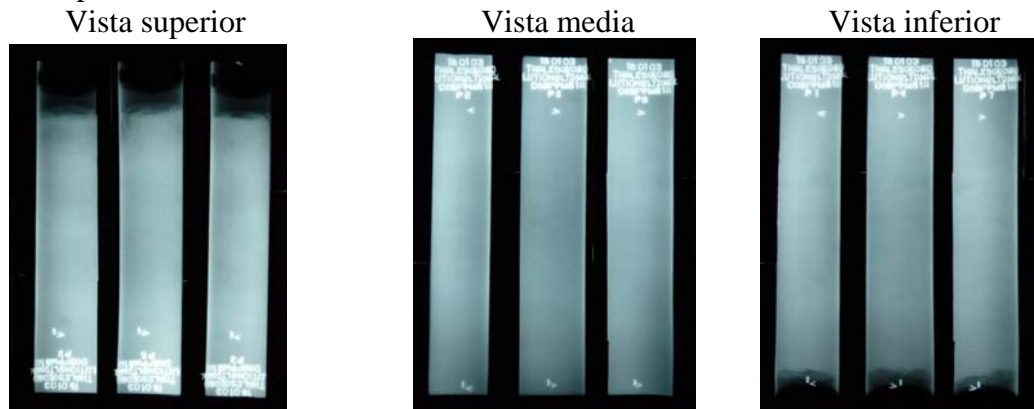


Fig 4.3 imagen de rayos X de muestra P19

Sondeo P17 profundidad 18 metros

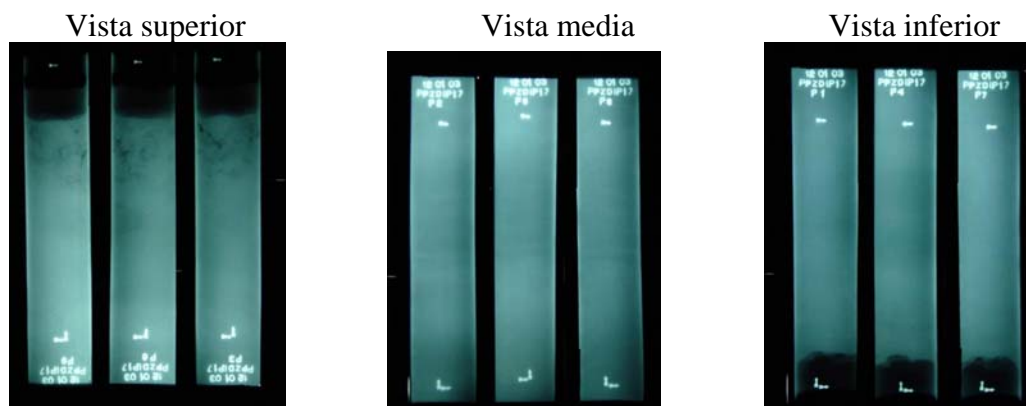


Fig 4.4 imagen de rayos X de muestra P17

Sondeo P24 profundidad 31 metros

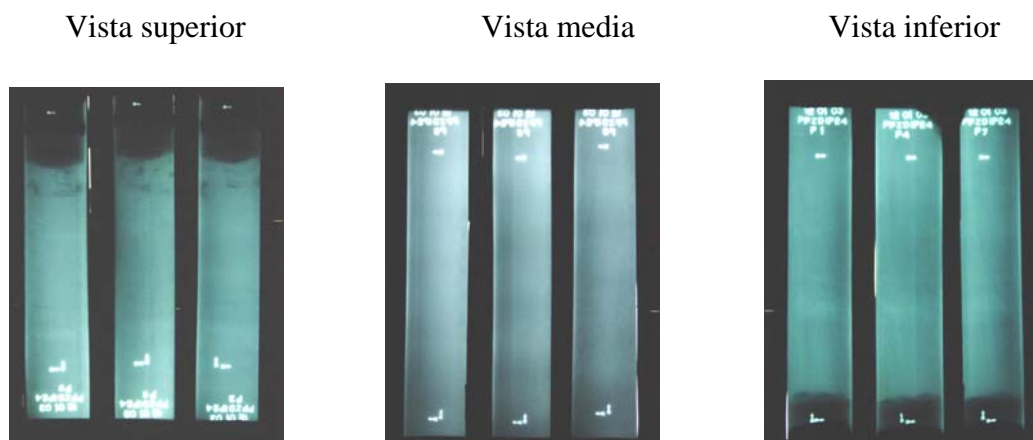


Fig 4.5 imagen de rayos X de muestra P24

4.4 Módulo de rigidez a pequeñas deformaciones

En las figuras 4.6 a 4.13 se muestran las curvas que relacionan G versus γ , realizadas con el equipo de columna resonante, asiendo un comparativo de las muestras utilizadas y también un comparativo a diferentes esfuerzos confinantes.

Se aprecia que a menor esfuerzo de confinamiento efectivo, un menor módulo de rigidez, también se aprecia que la deformación angular se comporta prácticamente de la misma manera para diferentes esfuerzos confinantes.

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1B
MUESTRA:	P01X
PROF.:	10.00 m

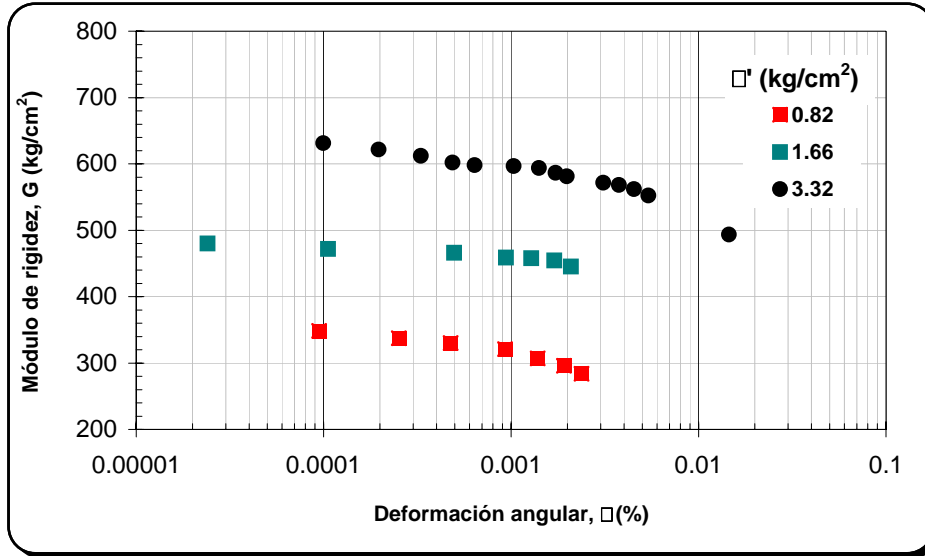


Fig 4.6 G- γ obtenido en CR (prueba P01X)

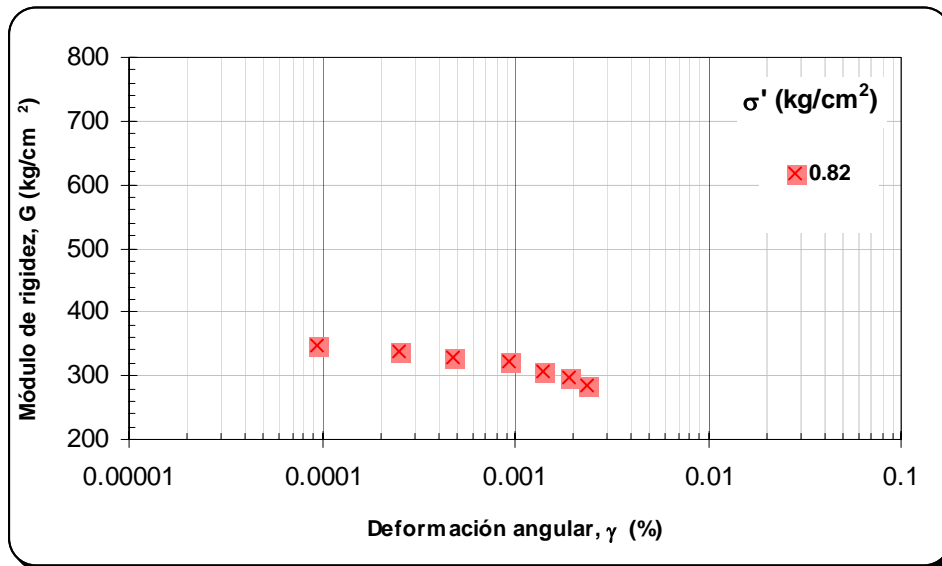


Fig 4.7 G- γ obtenido en CR (prueba P01X)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1A
MUESTRA:	P19
PROF.:	18.00 m

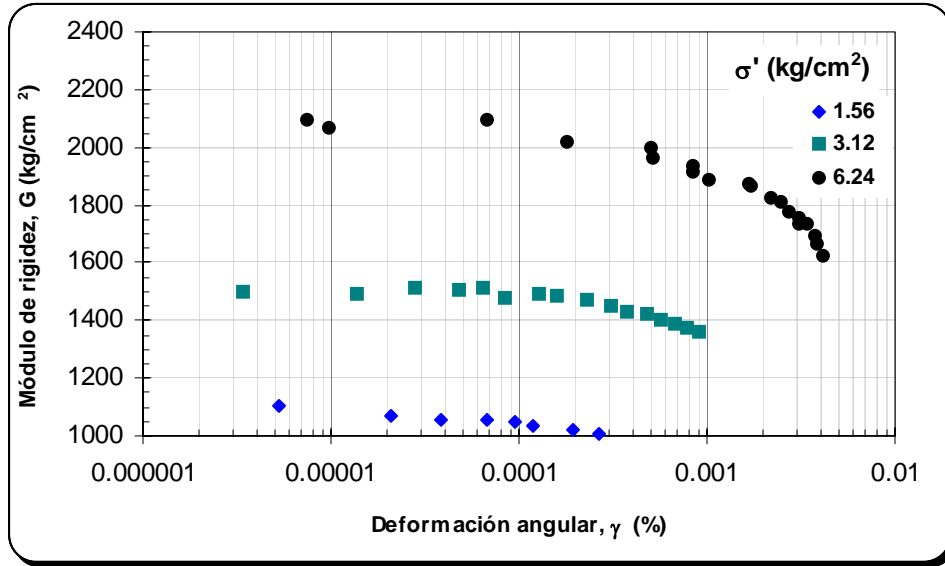


Fig 4. 8 G- γ obtenido en CR (prueba P19)

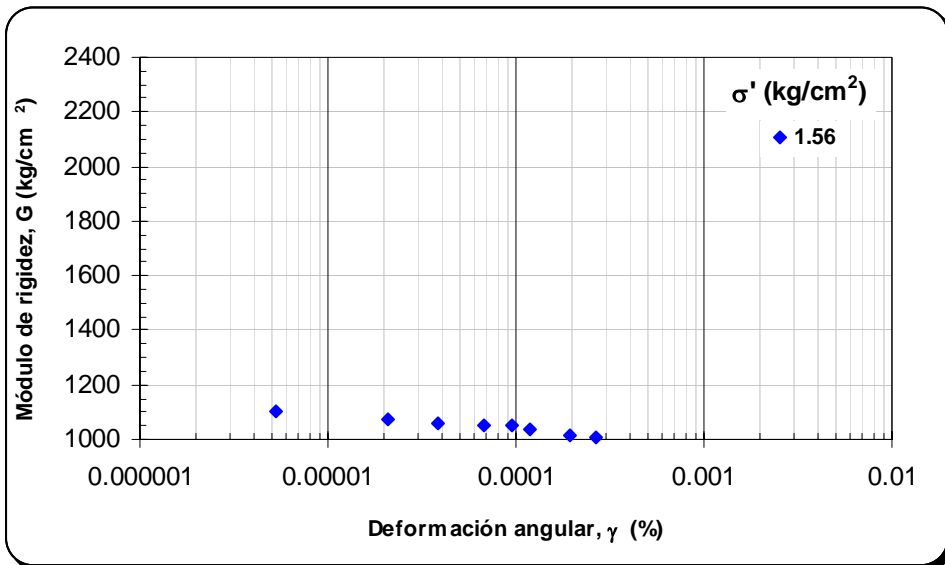


Fig 4.9 G- γ obtenido en CR (prueba P19)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P17
PROF.:	18.00 m

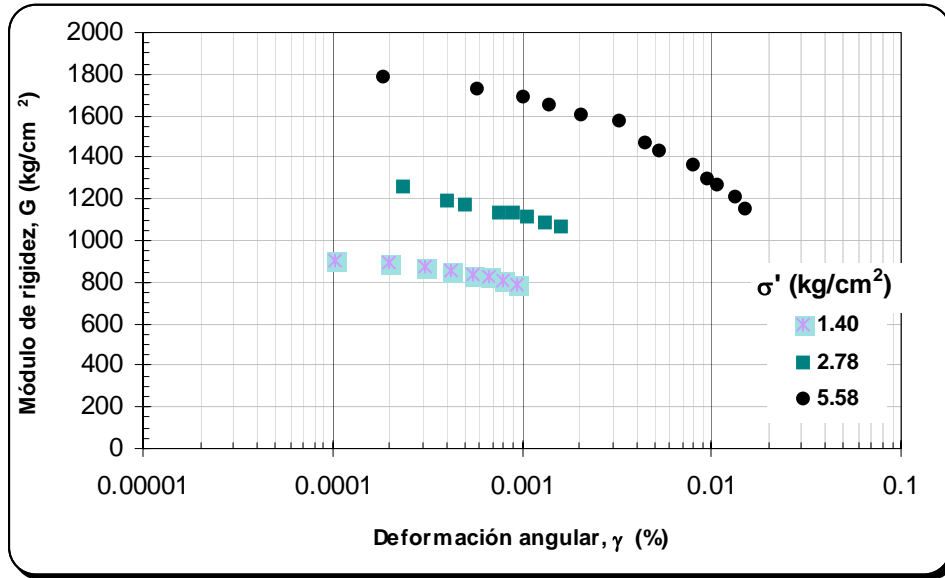


Fig 4.10 G- γ obtenido en CR (prueba P17)

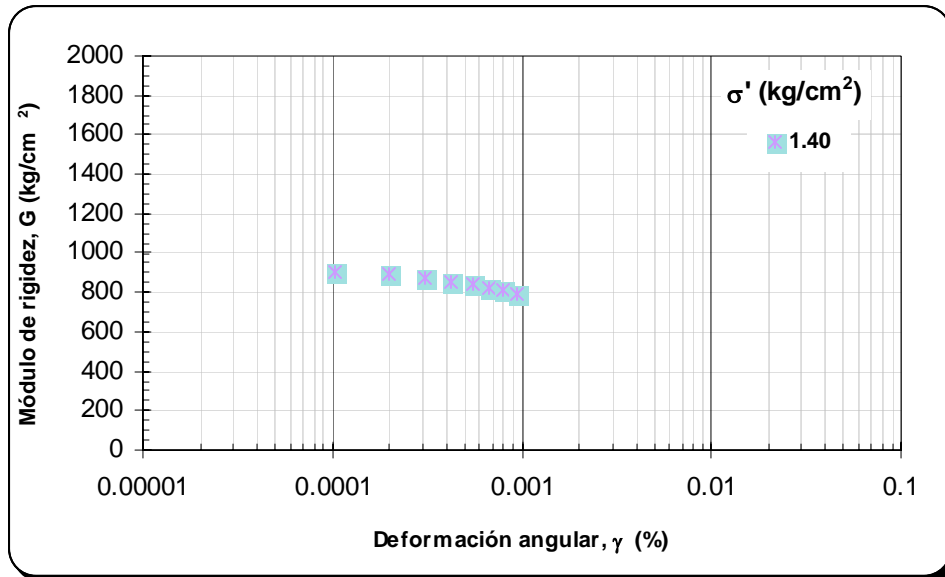


Fig 4.11 G- γ obtenido en CR (prueba P17)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P24
PROF.:	31.00 m

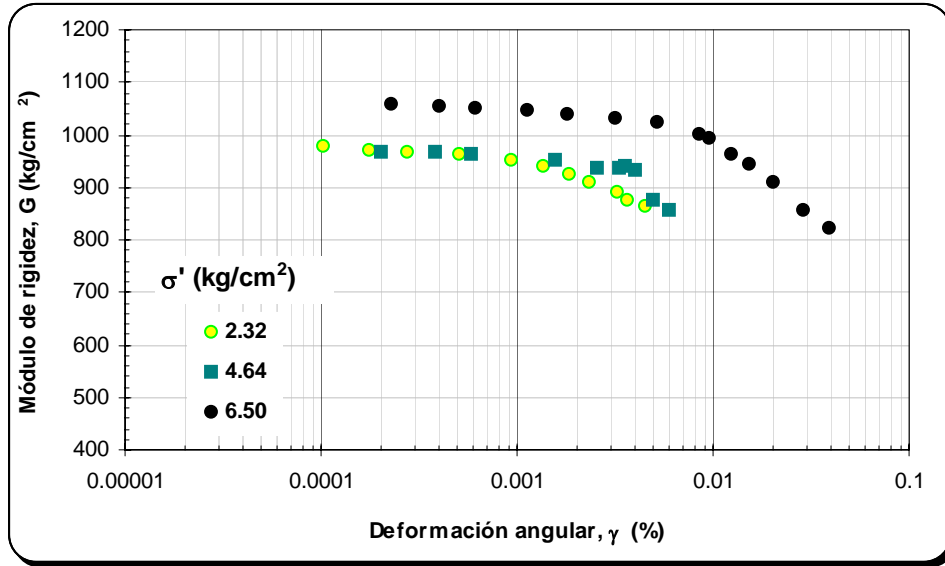


Fig 4.12 G- γ obtenido en CR (prueba P24)

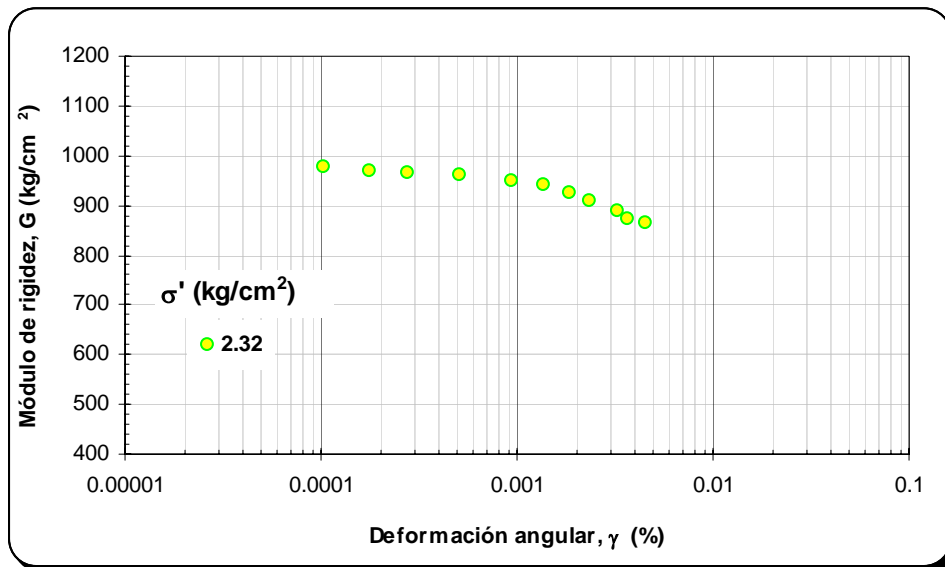


Fig 4.13 G- γ obtenido en CR (prueba P24)

4.5 Módulo de rigidez a grandes deformaciones

En las figuras 4.14 a 4.17 se muestran las curvas que relacionan G versus γ para un esfuerzo confinante que se le aplica a cada muestra, estas curvas se obtuvieron con el equipo de triaxial cíclica.

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1B
MUESTRA:	P01X
PROF.:	10.00 m

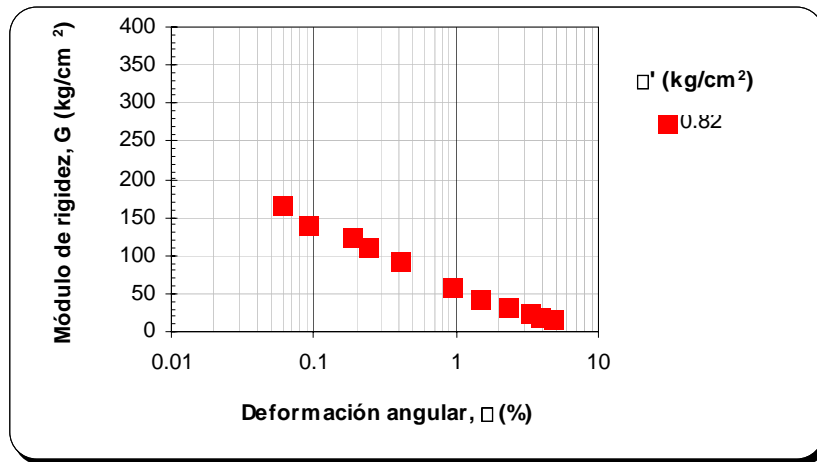


Fig 4.14 G- γ obtenido en TXC (prueba P01X).

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1A
MUESTRA:	P19
PROF.:	18.00 m

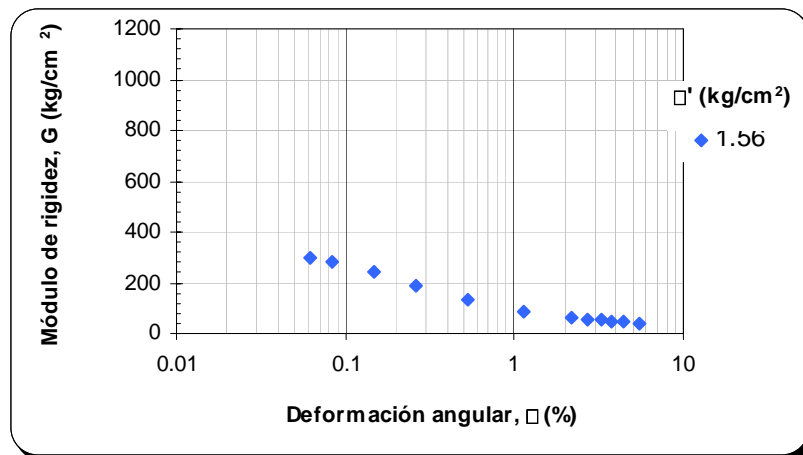


Fig 4.15 G- γ obtenido en TXC (prueba P19)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P17
PROF.:	18.00 m

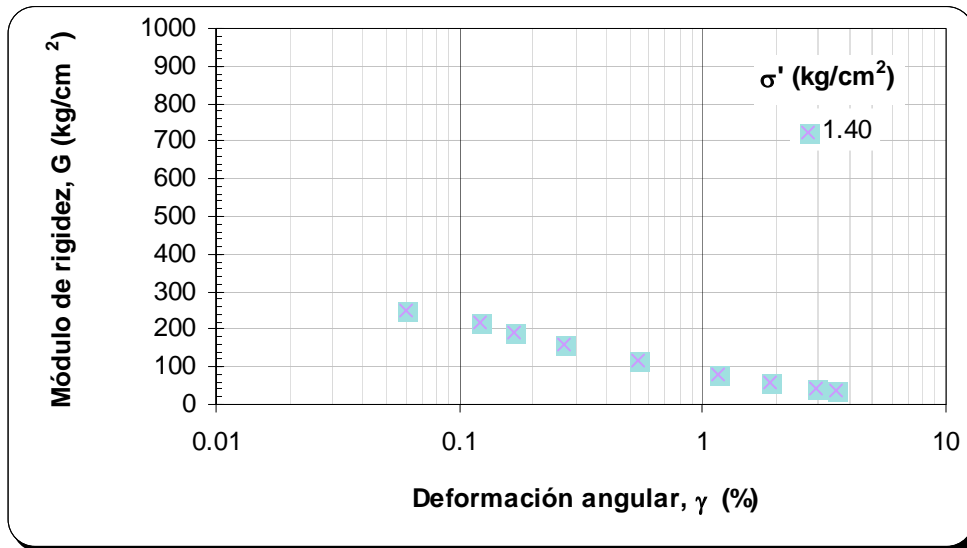


Fig 4.16 G- γ obtenido en TXC (prueba P17)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P24
PROF.:	31.00 m

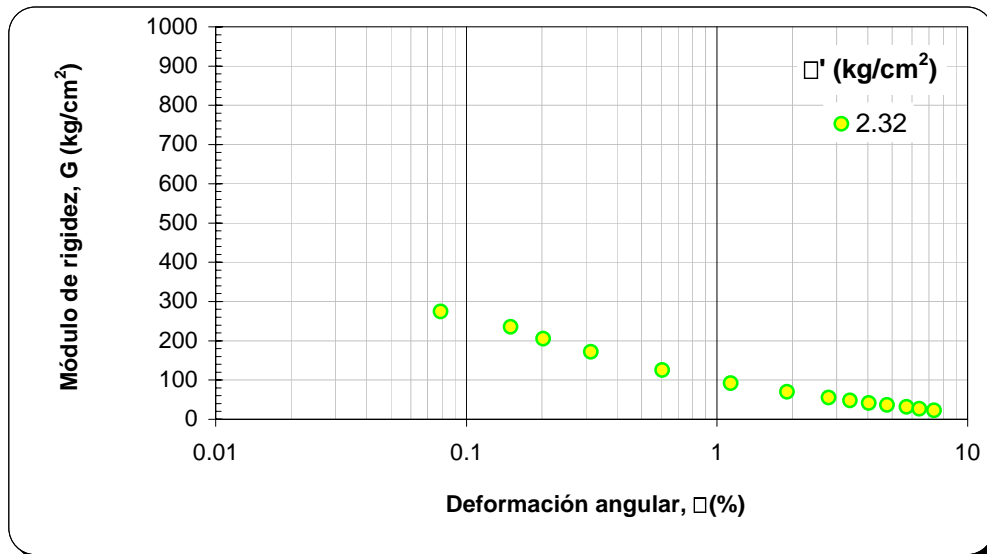


Fig 4.17 G- γ obtenido en TXC (prueba P24)

4.6 Módulo de rigidez a pequeñas y grandes deformaciones

En las figuras 4.18 a 4.21 se presenta la continuidad del parámetro G, obtenido de las figuras anteriores. Se tienen las curvas de variación del modulo de rigidez con el intervalo más amplio de deformación angular cíclica, para los esfuerzos efectivos que se indican, en la figura 4.23 se presentan las graficas para tener una mejor perspectiva del comportamiento de las muestras.

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1B
MUESTRA:	P01X
PROF.:	10.00 m

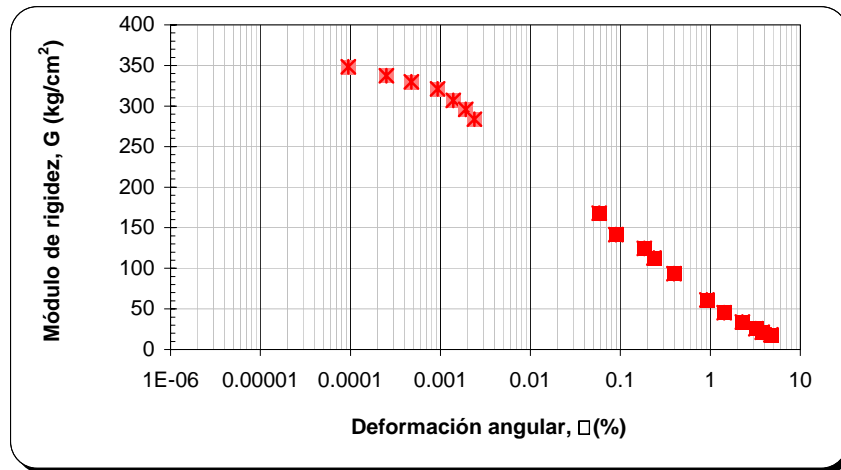


Fig 4.18 G- γ obtenido en CR y TXC (prueba P01X)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1A
MUESTRA:	P19
PROF.:	18.00 m

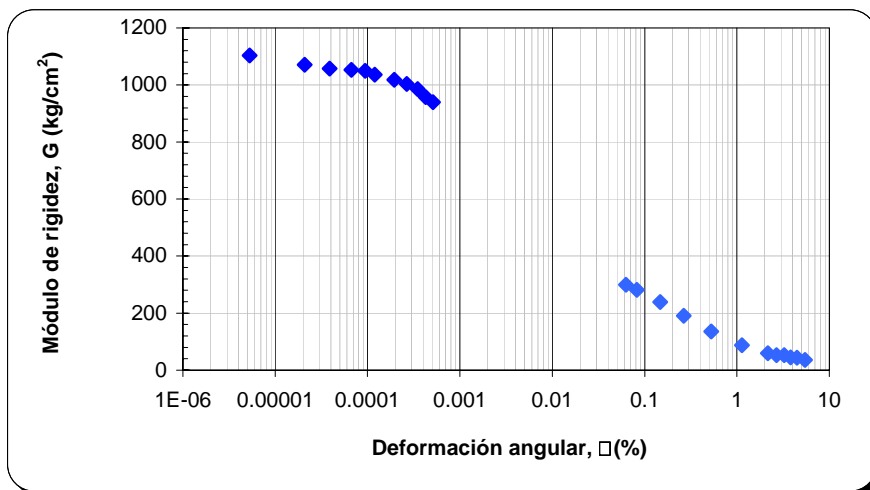


Fig 4.19 G- γ obtenido en CR y TC (prueba P19)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P17
PROF.:	18.00 m

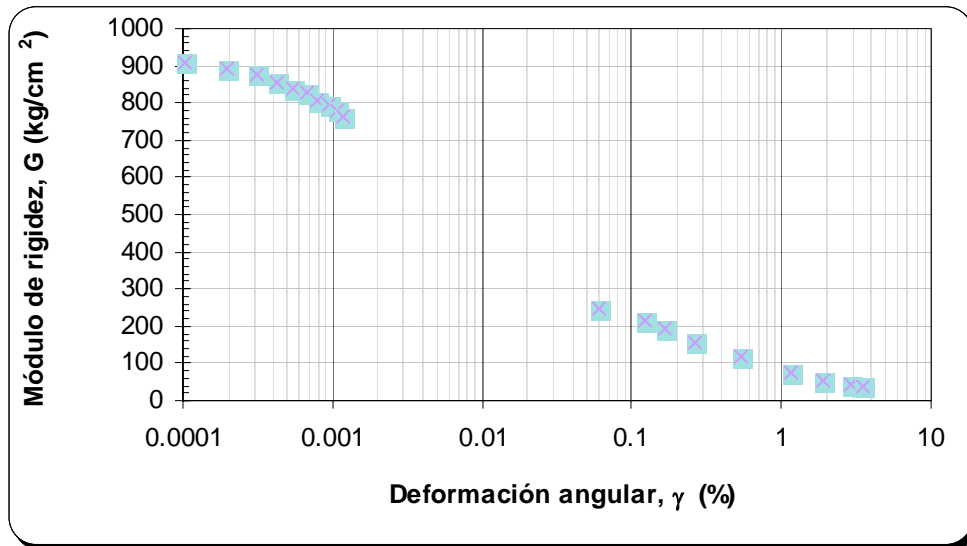


Fig 4.20 G- γ obtenido en CR y TXC (prueba P17)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P24
PROF.:	31.00 m

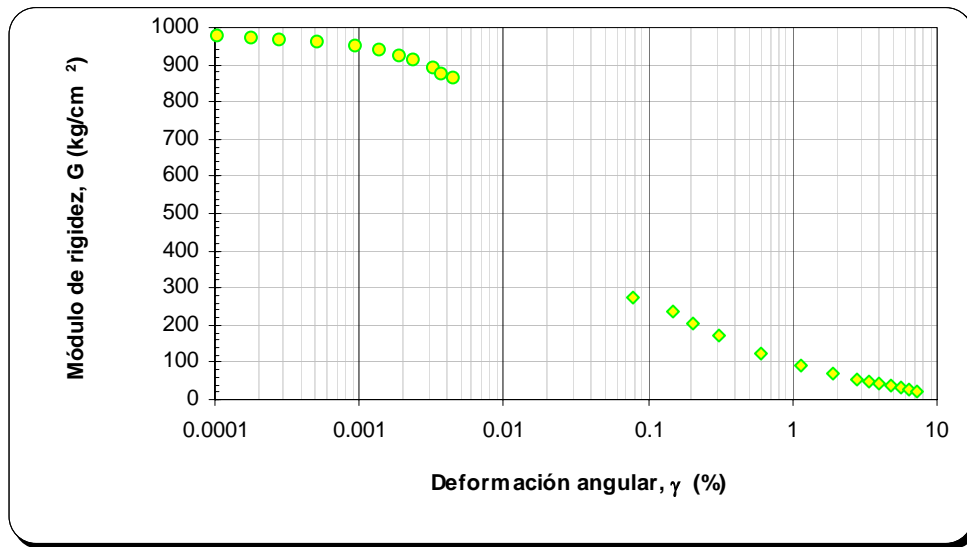


Fig 4.21 G- γ obtenido en CR y TXC (prueba P24)

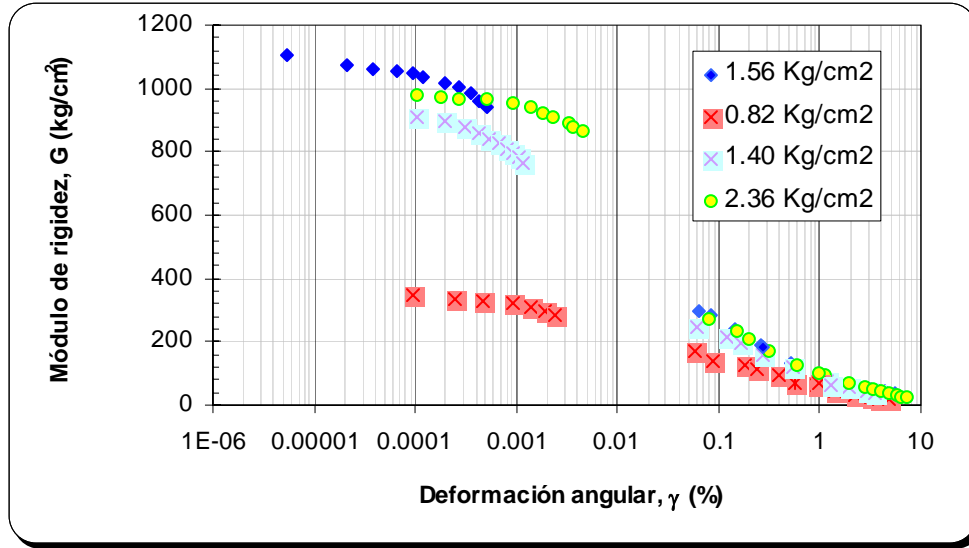


Fig 4.22 G- γ obtenido en CR y TXC

4.7 Relación de amortiguamiento a pequeñas deformaciones

En las figuras 4.23 a 4.26 se presentan los valores de la relación de amortiguamiento obtenidos en las pruebas P01X, P19, P17 y P24, se puede apreciar que los valores son constantes de λ con el incremento de γ , la relación de amortiguamiento varía entre el 1% y 2.5%.

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1B
MUESTRA:	P01X
PROF.:	10.00 m

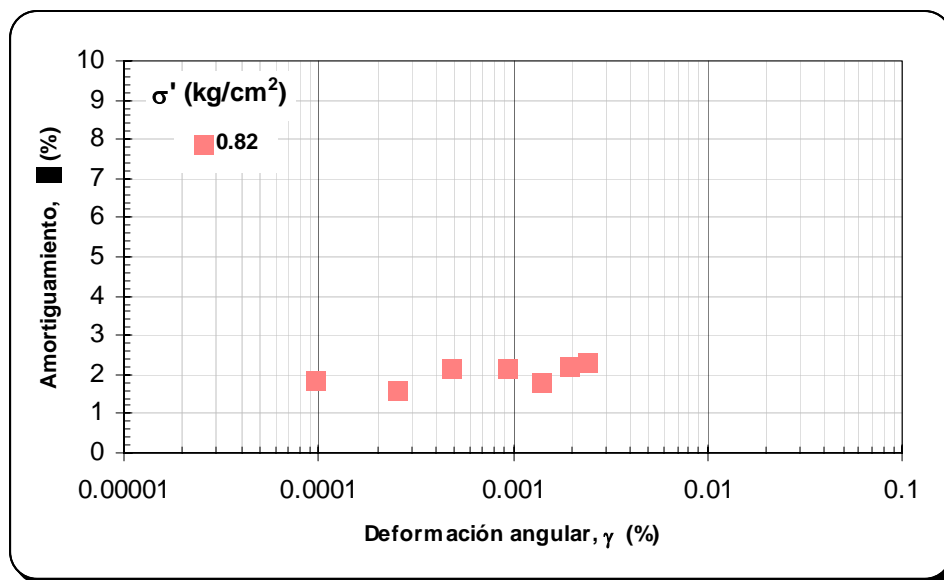


Fig 4.23 λ - γ obtenido en CR (prueba P01X)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1 ^a
MUESTRA:	P19
PROF.:	18.00 m

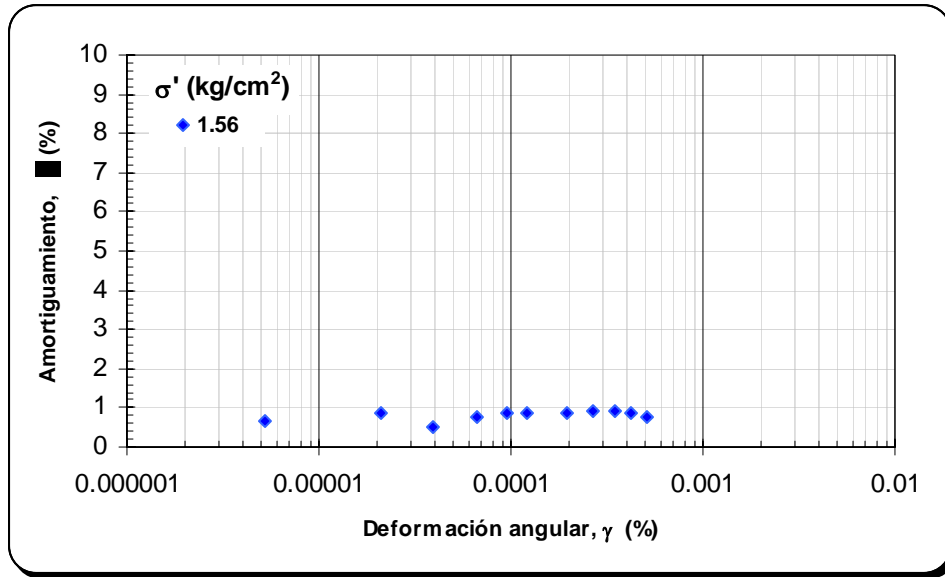


Fig 4.24 λ - γ obtenido en CR (prueba P19)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P17
PROF.:	18.00 m

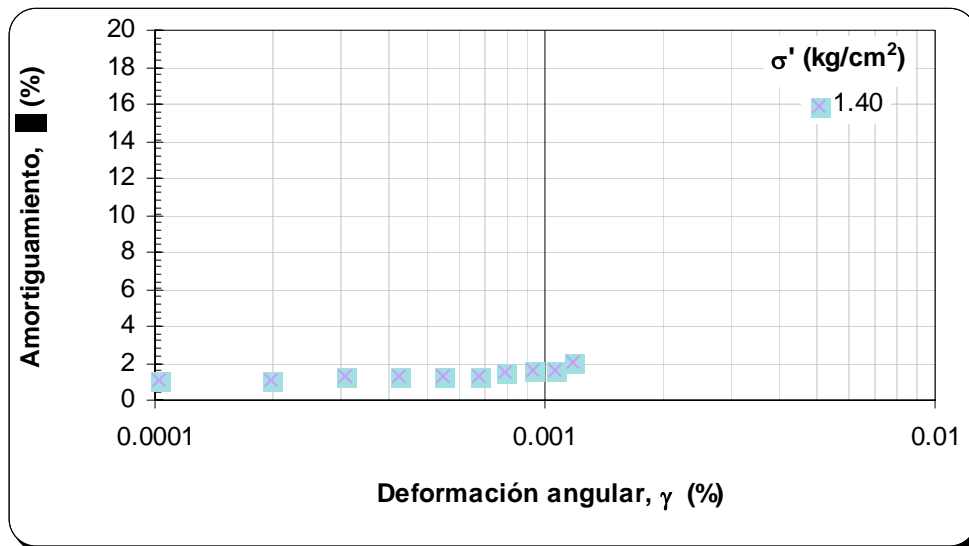


Fig 4.25 λ - γ obtenido en CR (prueba P17)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P24
PROF.:	31.00 m

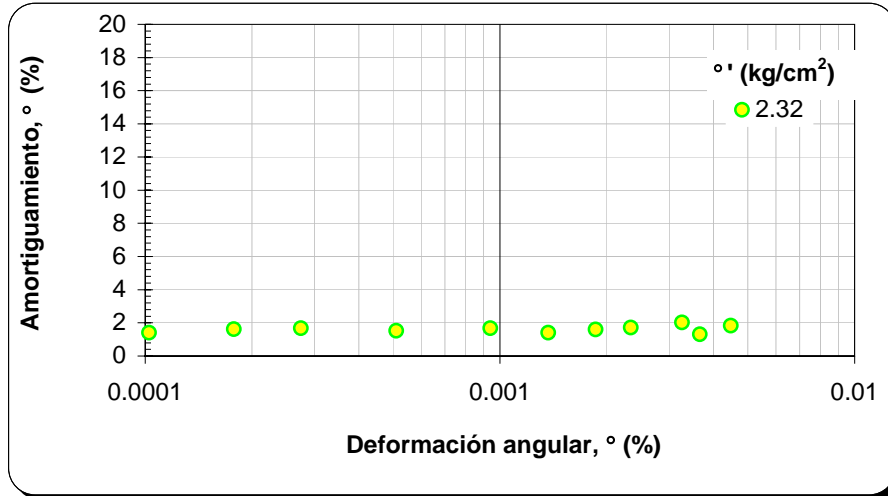


Fig 4.26 λ - γ obtenido en CR (prueba P24)

4.8 Relación de amortiguamiento a grandes deformaciones

En las figuras 4.27 a 4.30 se presentan las curvas que relacionan λ versus γ . En estas graficas se aprecia el incremento en la relación de amortiguamiento a grandes deformaciones 0.06% a 8%, alcanzando valores máximos aproximadamente de 18%.

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1B
MUESTRA:	P01X
PROF.:	10.00 m

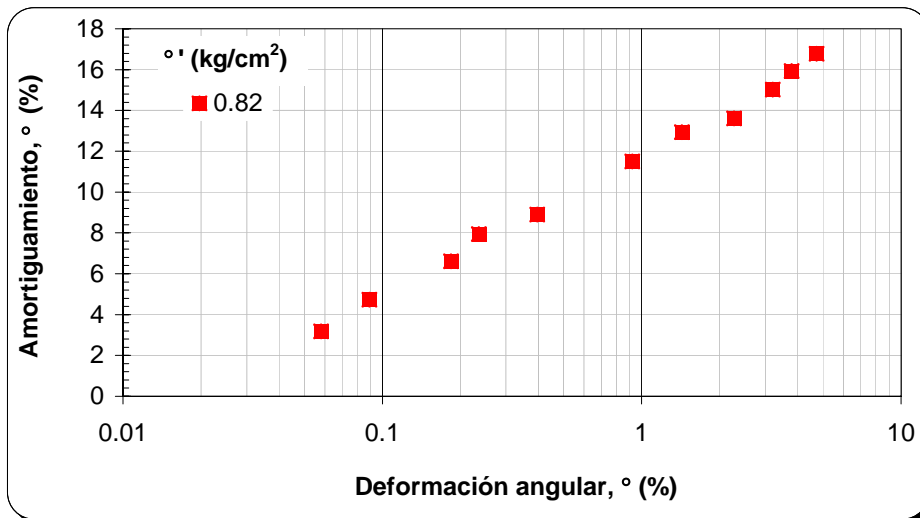


Fig 4.27 λ - γ obtenido en TXC (prueba P01X)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1 ^a
MUESTRA:	P19
PROF.:	18.00 m

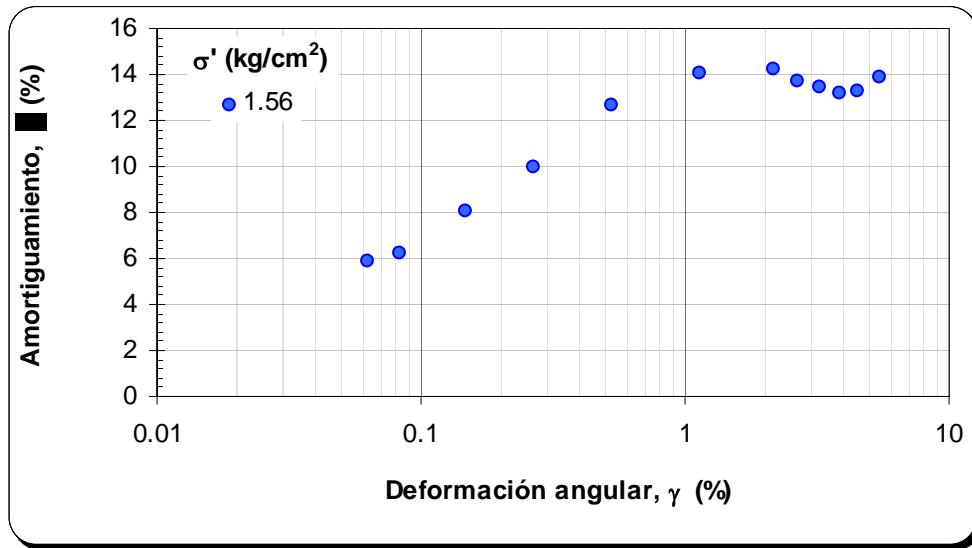


Fig 4.28 λ - γ obtenido en TXC (prueba P19)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P17
PROF.:	18.00 m

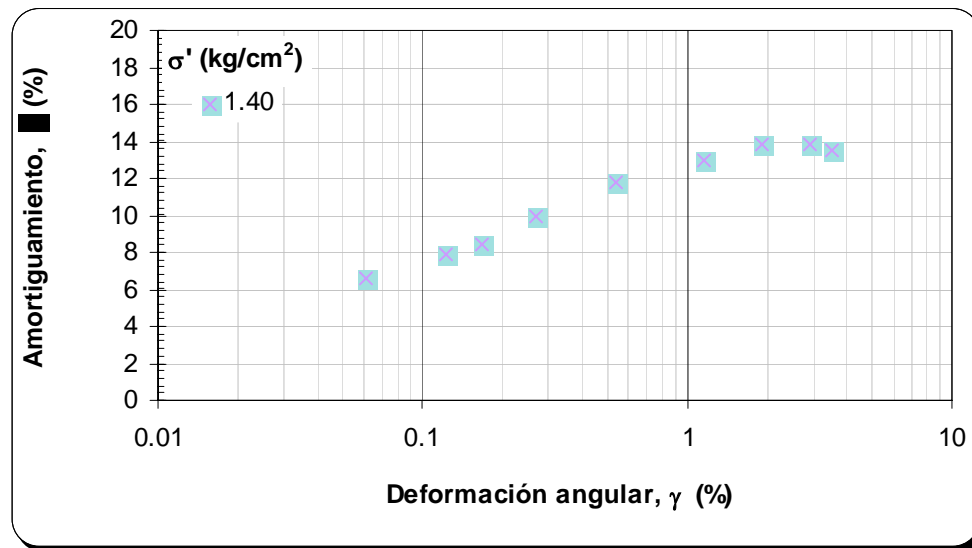


Fig 4.29 λ - γ obtenido en TXC (prueba P17)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P24
PROF.:	31.00 m

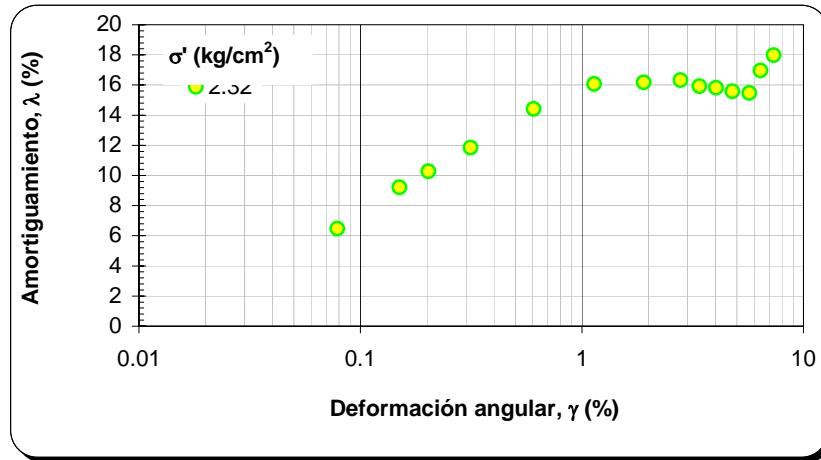


Fig 4.30 λ - γ obtenido en TXC (prueba P24)

4.9 Relación de amortiguamiento a pequeñas y grandes deformaciones

En las figuras 4.32 a 3.35 se muestran la curva de variación de la relación de amortiguamiento con la deformación angular (1×10^{-6} % a 10%) de las diferentes muestras, así como en la figura 4.36 se presenta las cuatro curvas para tener comparativo de las diferentes muestras.

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1B
MUESTRA:	P01X
PROF.:	10.00 m

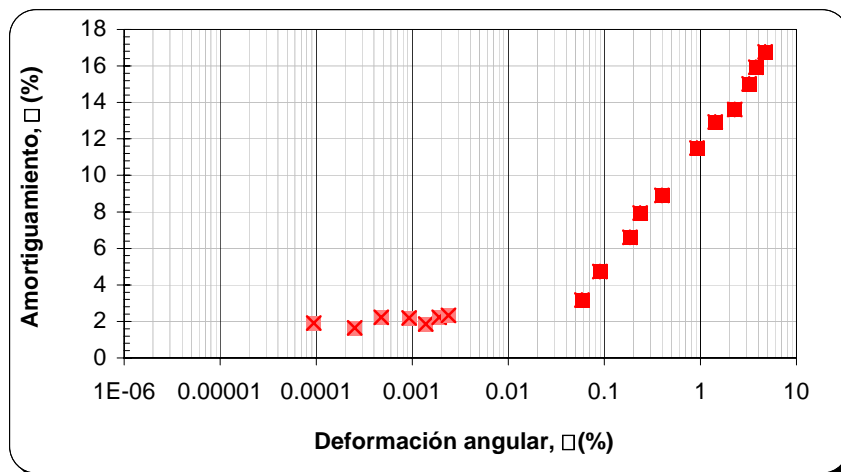


Fig 4.31 λ - γ obtenido en CR y TXC (prueba P01X)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	KU PP-MB-1A
MUESTRA:	P19
PROF.:	18.00 m

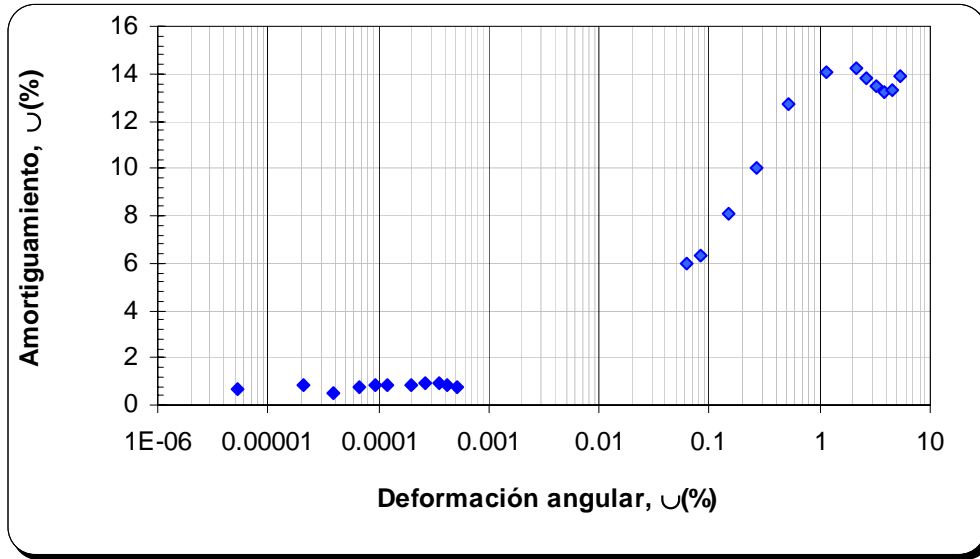


Fig 4.32 λ - γ obtenido en CR y TXC (prueba P19)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P17
PROF.:	18.00 m

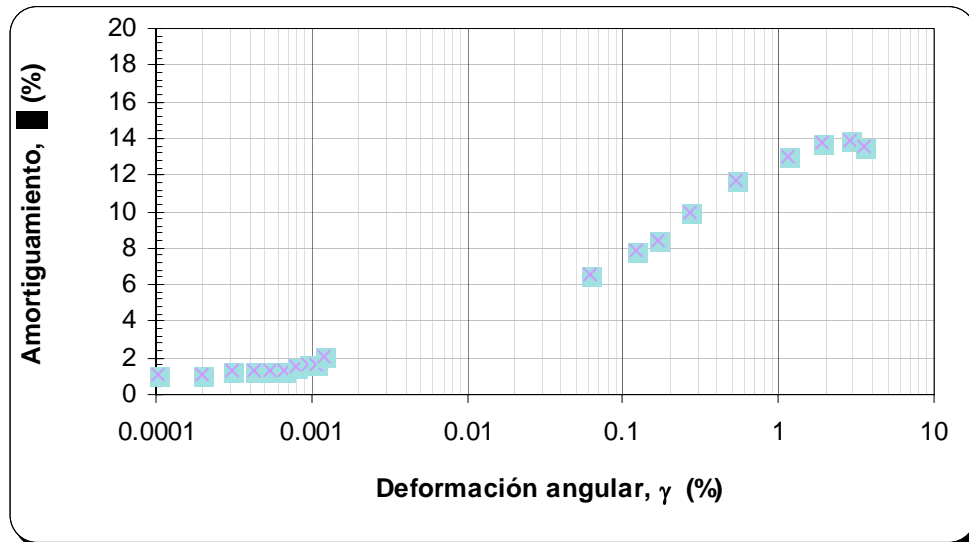


Fig 4.33 λ - γ obtenido en CR y TXC (prueba P17)

PROYECTO:	Sonda de Campeche
SONDEO:	PP-ZD-1
MUESTRA:	P24
PROF.:	31.00 m

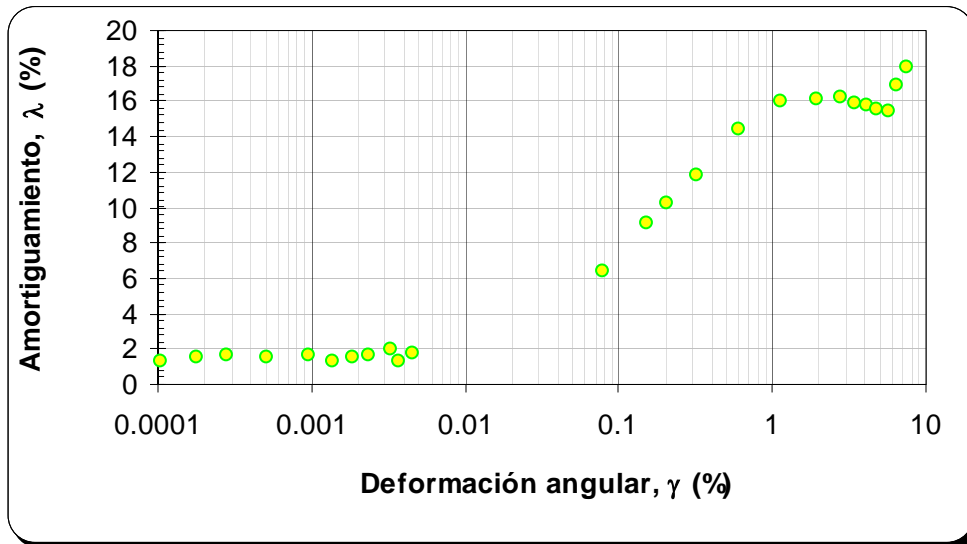


Fig 4.34 λ - γ obtenido en CR y TXC (prueba P24)

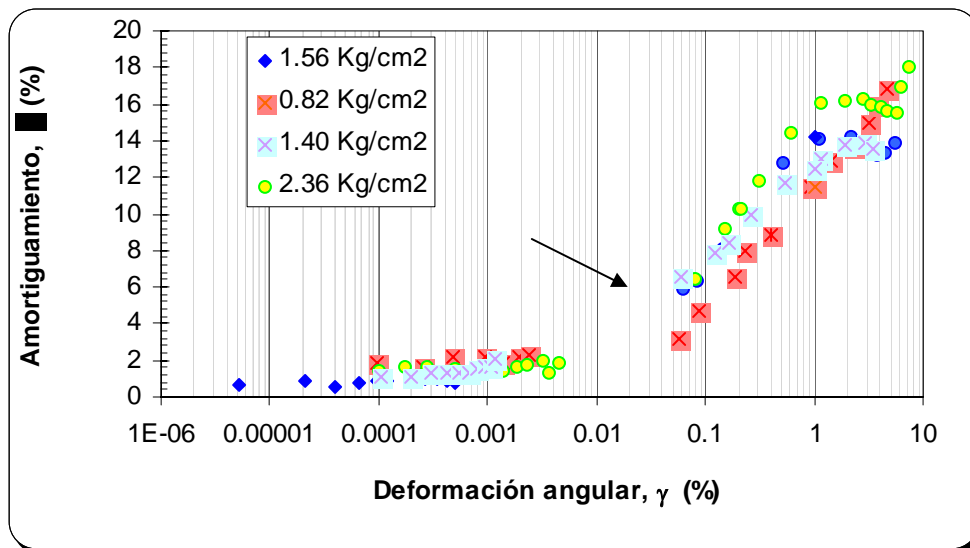


Fig 4.35 λ - γ obtenido en CR y TXC

4.10 Parámetros más importantes

4.10.1 Efecto de σ' en G

En la Figura 4.36 se muestra el módulo de rigidez para diferentes valores de esfuerzos efectivos de consolidación. Se observa que prácticamente la rigidez dinámica de

la muestra aumenta al incrementarse la magnitud del esfuerzo efectivo al que se consolida y disminuye al crecer la deformación angular.

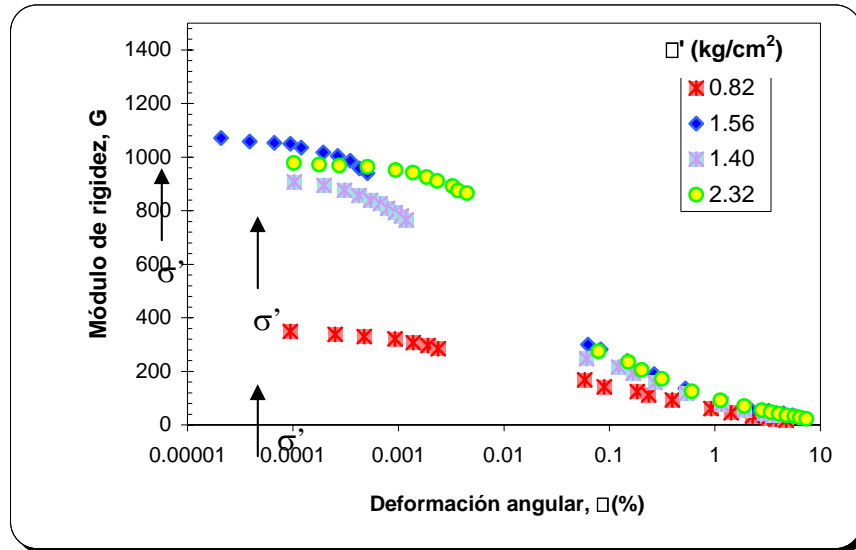


Fig 4.36 efecto de σ' en el módulo G

4.10.2 Efecto de σ' en λ

En la figura 4.37 se presenta la curva de la relación de amortiguamiento, λ versus γ , en estas se muestra que a pequeñas deformaciones a pesar de incrementarse el esfuerzo efectivo el amortiguamiento es casi constante, alcanzando valores de 1% a 3%. En lo que respecta a las deformaciones de 0.05% hasta 9% el amortiguamiento alcanza valores del 18%, al llegar cerca de la falla se alcanzan incrementos muy abruptos.

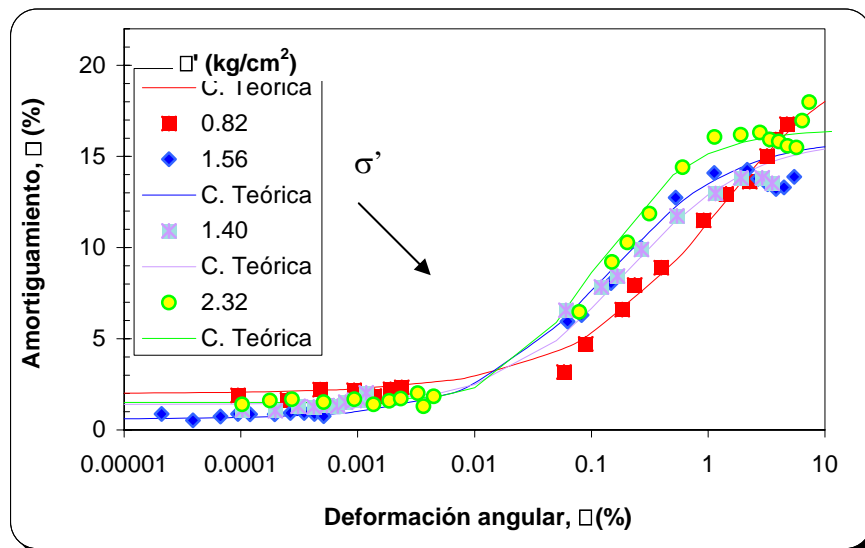


Fig 4.37 efecto de σ' en λ

4.10.3 Efecto del I_p en el módulo de G

Cuando las curvas del módulo de rigidez *versus* deformación angular se normalizan con respecto al módulo de rigidez dinámico a pequeñas deformaciones ($\gamma \leq 10^{-6}$, $G_{m\acute{a}x}$), el esfuerzo del efecto confinante disminuye apreciablemente. En la figura 4.38 se presenta las curvas de $G/G_{m\acute{a}x}$ vs γ para el complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap, en esta grafica se puede apreciar que a partir de deformaciones mayores de 0.0001%, los valores de $G/G_{m\acute{a}x}$ tienden a incrementarse cuando el índice de plasticidad aumenta para una misma deformación angular.

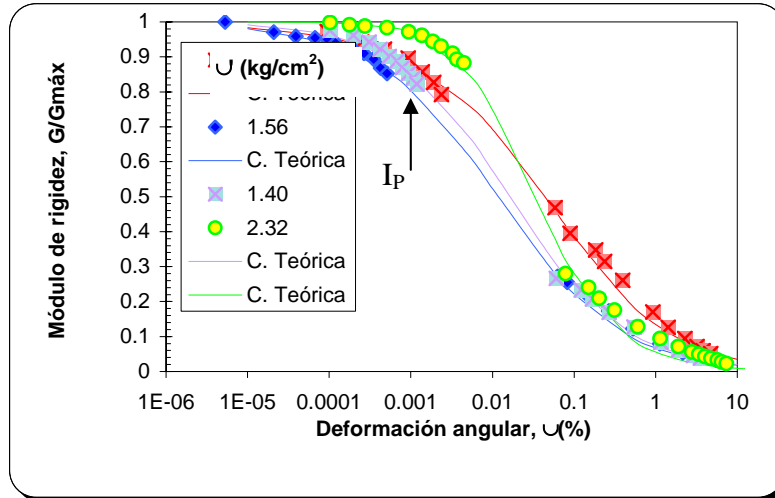


Fig 4.38 efecto de I_p en $G/G_{m\acute{a}x}-\gamma$

4.10.4 Efecto del I_p en la relación de amortiguamiento, λ

Se presenta el efecto del índice de plasticidad en la relación de amortiguamiento, en la figura 4.39 se tiene los valores de confinamiento del orden de $\sigma' = 0.82$ a 2.32 kg/cm^2 , de estas figuras se concluye que cuando el índice de plasticidad aumenta, la capacidad de disipar energía disminuye.

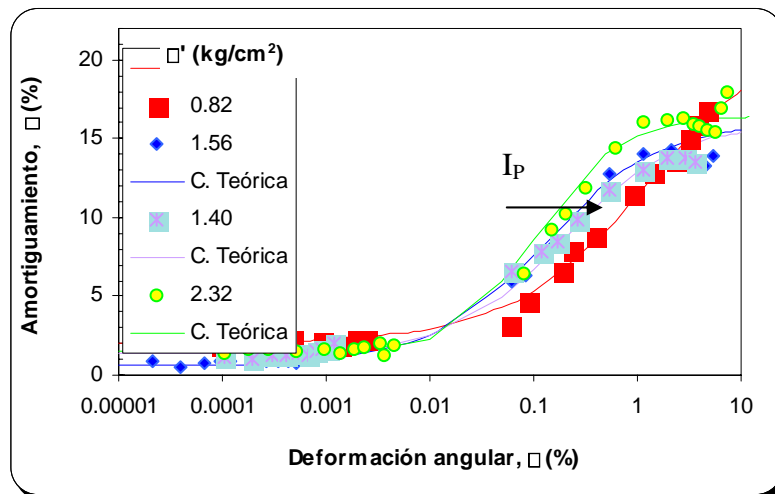


Fig 4.39 efecto de I_p en la relación de amortiguamiento

4.10. 5 Efecto del número de ciclos en el módulo G

La degradación del módulo de rigidez dinámico con el número de ciclos para una misma deformación se estudio aplicando pruebas a deformaciones controladas aplicando un total de 30 ciclos, en estas figuras 4.40 y 4.41, son del sondeo P19, siendo de una manera representativa para todas las muestras del complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap.

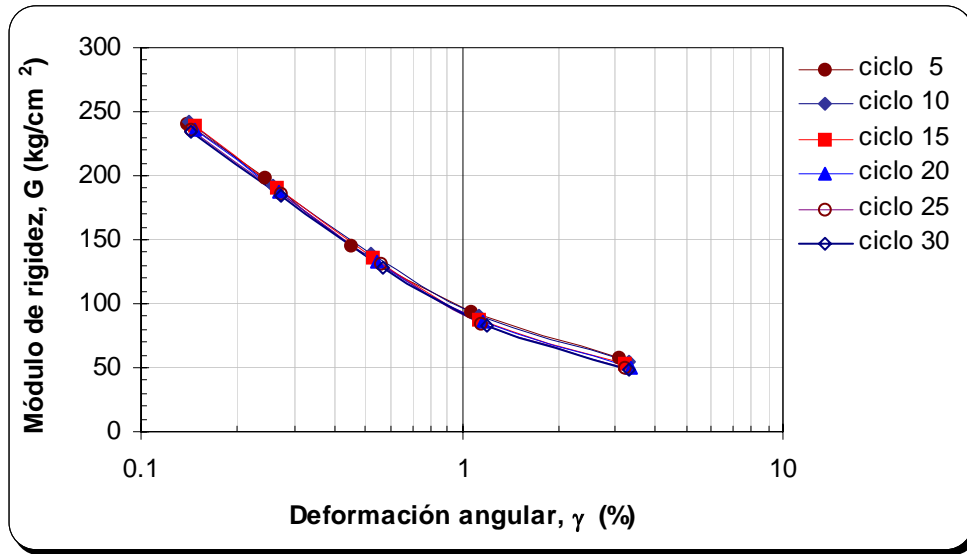


Fig 4.40 variación de G versus γ , en función del número de ciclos

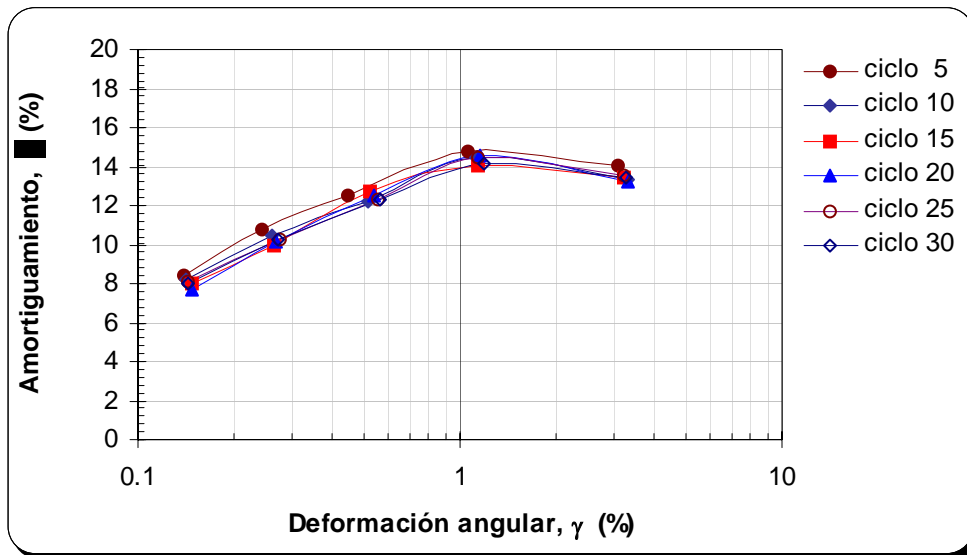


Fig 4.41 variación de G versus γ , en función del número de ciclos

4.11 Modelación numérica de la variación de G y λ con la deformación angular

Para modelar la relación no lineal de la deformación angular con el módulo de rigidez, G, y la relación de amortiguamiento, λ , se utilizó el modelo de *Davidenkov* (Romo y Ovando, 1995). El cual se basa en tres principios conocidos como hipótesis de Masing:

1. La no linealidad del material es de naturaleza plástica, es decir, la rigidez del suelo regresa a su valor máximo cada vez que la carga cambia de sentido
2. El amortiguamiento es de tipo histerético
3. El material sometido a carga armónica con amplitud constante responde de manera estable, si el amortiguamiento histerético es suficiente para atenuar en pocos ciclos la parte transitoria

Haciendo un resumen de las expresiones empleadas para la modelación:

$$G = G_{\text{máx}} [1 - H(\gamma)] \quad 4.1$$

donde: $H(\gamma)$ esta en función de los parámetros γ_r , A' y B, como se indica en la ecuación 4.2 (Romo, 1995).

$$H(\gamma) = \left[\frac{(\gamma / \gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma / \gamma_r)^{2B}} \right]^{A'} \quad 4.2$$

y

$$A' = A + I_r \quad 4.3$$

El índice de consistencia, I_r , esta dado por

$$I_r = \frac{W_L - W_n}{I_p} \quad 4.4$$

donde: W_L contenido de agua en el límite líquido
 W_n contenido natural de agua
 I_p índice de plasticidad

Conociendo la función $H(\gamma)$ y el valor de $G_{\text{máx}}$, se pueden obtener los valores G para cualquier deformación angular. En la ec. 4.2, γ_r , A' y B, son parámetros del suelo que se obtienen a partir de los ensayos dinámicos y definen la geometría de la curva que relaciona a G y γ , γ_r es una deformación angular que representa, el valor de γ para una degradación del módulo G de 50 %.

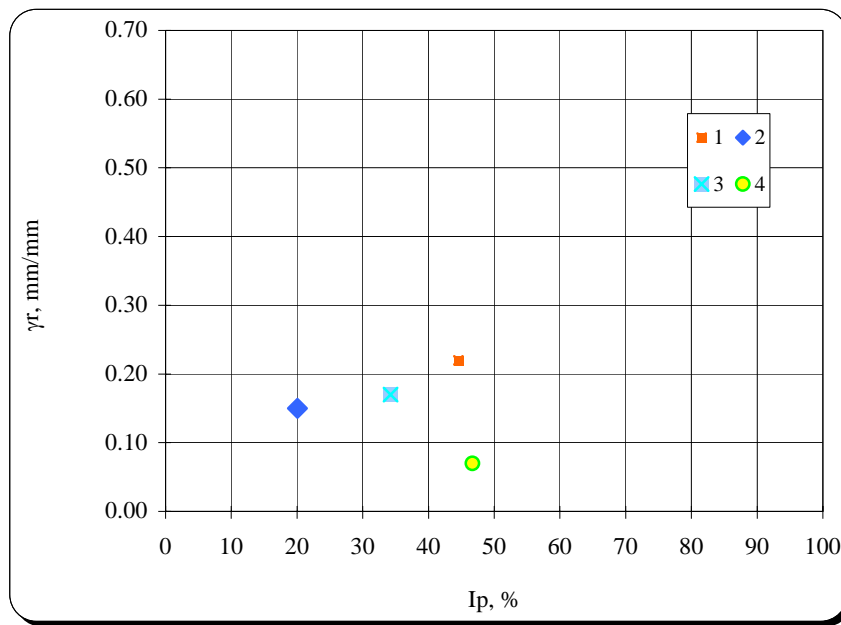
Para calcular el amortiguamiento se hace uso de la expresión 4.5 propuesta por Romo, (1995), considerando las condiciones de frontera para deformaciones pequeñas: $H(\gamma) \Rightarrow 0$ y $(\gamma) = (\gamma_{\min})$; y para deformaciones angulares altas: $H(\gamma) \Rightarrow 1$ y $\gamma = \gamma_{\max}$.

$$\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})H(\gamma) + \lambda_{\min} \tag{4.5}$$

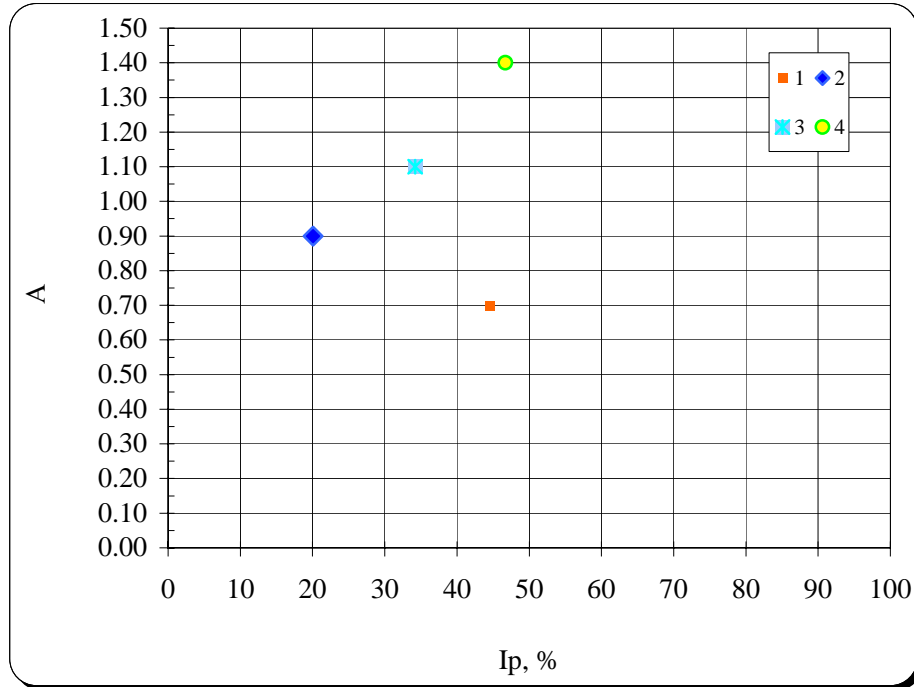
4.12 Determinación de los parámetros γ_r , A y B

Teniendo los valores de referencia, se aplico el modelo de *Davidenkov* y se encontró la variación de los parámetros A y B correspondiente a cada ensaye, los cuales se presentan en las figuras 4.42b y 4.42c. Con los valores de A y B, se cálculo nuevamente el valor de H(γ) para diferentes valores de esfuerzo efectivo.

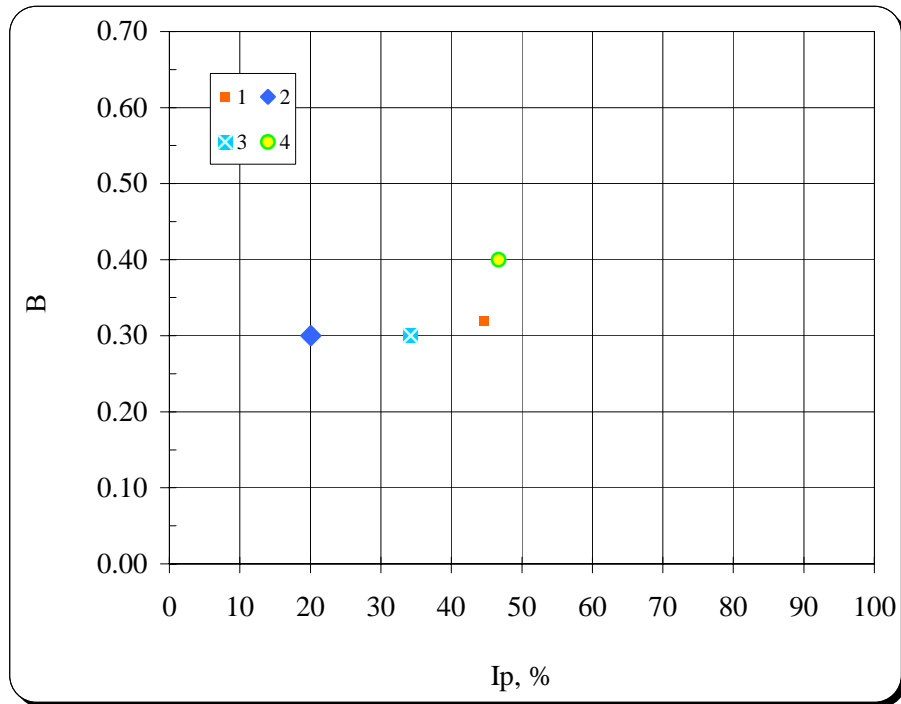
En la figura 4.42 se observa la variación de los parámetros γ_r , A y B, los valores del parámetro A para la Sonda de Campeche están en el intervalo de 0.7 a 1.4 para un índice de plasticidad entre 20% y 50%. El parámetro B de la Sonda de Campeche se encuentra entre 0.30 y 0.40, para estos valores de índice de plasticidad.



a) Parámetro γ_r



b) Parámetro A



c) Parámetro B

Fig 4.42 Efecto del índice de plasticidad, IP, en los parámetros γ_r , A y B

4.13 Ajuste del modelo de *Davidenkov* a los resultados experimentales

En las figuras 4.43, 4.44 y 4.45 se presenta el comparativo del modelo teórico con lo obtenido en el laboratorio en esta grafica se observa que se aproximan muy bien a los valores experimentales.

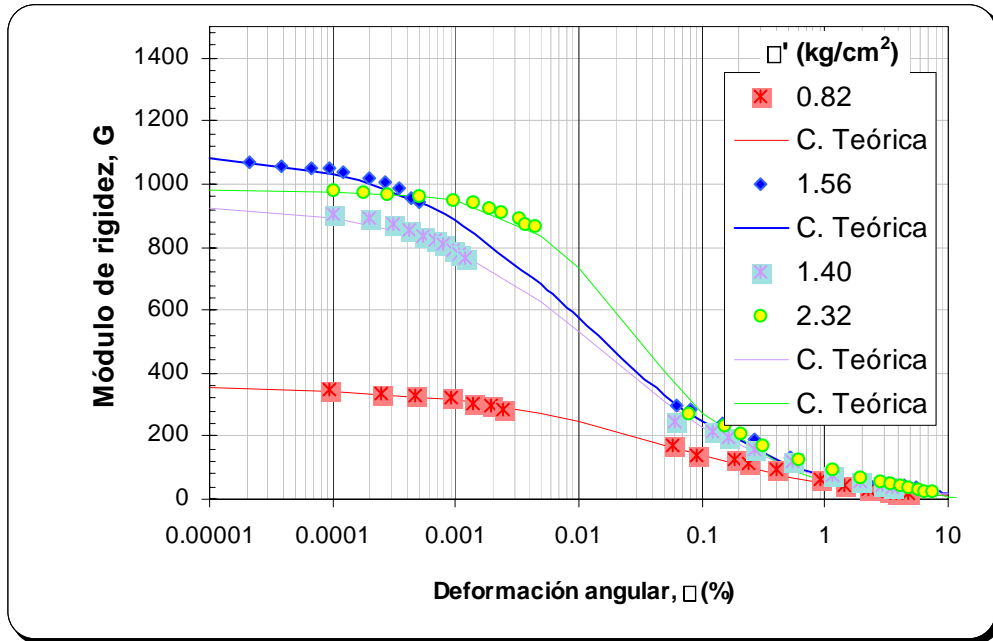


Fig 4.43 G- γ ajuste teórico

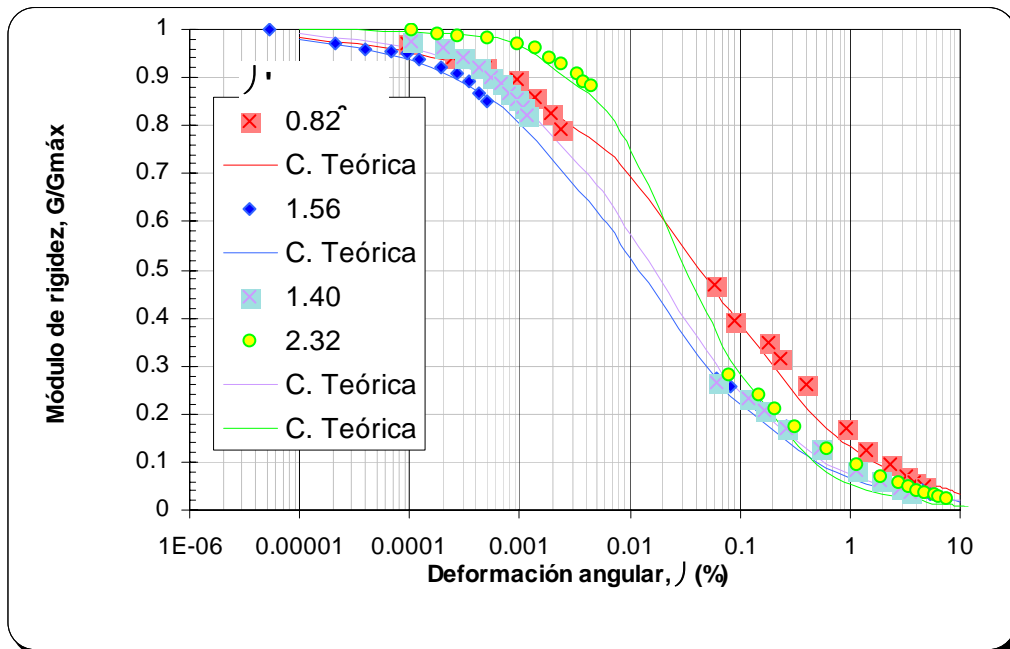


Fig 4.44 $G_{\text{máx}}-\gamma$ ajuste teórico

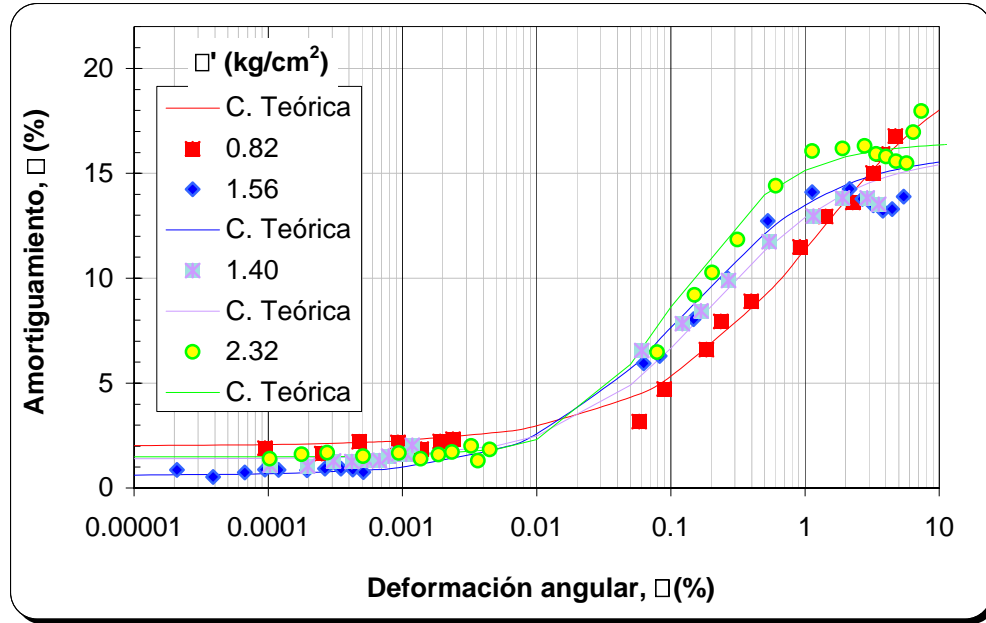


Fig 4.45 λ - γ ajuste teórico

4.14 Características de los suelos de complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap

En la Tabla 1 se presenta el número de sondeos, profundidades de extracción de las muestras, sus propiedades índice y las características de los ensayos. Los materiales encontrados se clasifican como arcillas de alta plasticidad (CH).

Tabla 1. Propiedades índice y mecánica de los suelos

Sondeo	Muestra	Profundidad M	Límite Líquido %	Límite Plástico %	Contenido agua %	Índice de Plasticidad %	Densidad relativa de sólidos	σ'_c Kg/cm ²
MB-1B	P01X	10	78.32	33.76	64.10	44.56	2.81	0.82
MB-1A	P19	18	44.03	23.94	37.63	20.08	2.79	1.56
ZD-1	P17	18	59.45	25.24	46.51	34.21	2.81	1.40
ZD-1	P24	31	76.02	29.31	47.45	46.71	2.77	2.32

En la tabla 2 se analizaron para este trabajo 4 pruebas en columna resonante y triaxial cíclica. En el cual se muestran los datos obtenidos experimentalmente de muestras obtenidas a diferentes profundidades en el complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap, también se muestran los parámetros A, B, γ_r , y $G_{m\acute{a}x}$ obtenidos para realizar el modelo de *Davidenkov*.

Tabla 2 Datos obtenidos para alimentar el modelo de Davidenkov

No	Prueba	Obtenidos experimentalmente			Parámetros del modelo		
		I_p	σ'	$G_{m\acute{a}x}$	γ_r	A	B
1	P01X	44.56	0.82	358	.22	0.7	0.32
2	P19	20.08	1.56	1103	0.15	0.9	0.3
3	P17	34.21	1.40	930	0.17	1.1	0.3
4	P24	46.71	2.32	980	0.07	1.4	0.4

5 CONCLUSIONES

México es un país productor de petróleo, por tal motivo es importante seguir explorado y explotando sus recursos de hidrocarburos, ahora que se le a dado una gran importancia al gas natural, la Sonda de Campeche es la región más importante de explotación de recursos de hidrocarburos, dentro de sus complejos petroleros produce la gran mayoría de los hidrocarburos con los que cuenta el país, estos complejos petroleros se encuentran costa fuera.

Actualmente México cuenta con una importante red de plataformas marinas dentro de sus diferentes complejos petroleros, dentro de estos complejos podemos encontrar las diferentes plataformas, desde las mas elementales, como pueden ser las habitacionales, hasta las más grandes a nivel mundial, tanto fijas como flotantes.

Para diferentes esfuerzos efectivos el amortiguamiento para pequeñas deformaciones prácticamente se mantiene constante, alcanzando valores de 1% hasta 3%, para deformaciones angulares mayores el amortiguamiento alcanza los valores de 18%, al llegar cerca de la falla se alcanzan incrementos muy abruptos.

Los resultados presentados en los pruebas de columna resonante y triaxial cíclica reflejan que la respuesta dinámica de las arcillas del complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap, dependen del nivel de deformación inducido, para pequeñas deformaciones la respuesta es prácticamente lineal donde las arcillas tiene poca capacidad para disipar energía.

Para deformaciones grandes, la respuesta no es lineal, el amortiguamiento aumenta y la degradación de la rigidez es importante, a partir de deformaciones de 0.0001% los valores de G/G_{max} tiende a incrementarse cuando el indice de plasticidad aumenta para una misma deformación angular.

El amortiguamiento como el módulo de rigidez para diferentes números de ciclos se mantiene constante.

El modelo utilizado para analizar el comportamiento dinámico de los suelos arcillosos del complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap presenta buena aproximación con las tendencias de las curvas experimentales, lo que nos lleva una buena correlación con las propiedades índice de las arcillas que son obtenidas de forma rápida.

REFERENCIAS

Capítulo I

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros de espectro de diseño en México (CFE1993).....	10
--------------------------------------------------------------------	----

Lista de figuras

Figura 1.1 pozos en la Sonda de Campeche (PEMEX 2001).....	3
Figura 1.2 localización de la Sonda de Campeche (PEMEX 1985).....	5
Figura 1.3. Distribución de carbonatos en los sedimentos recientes (PEMEX, 1985).....	6
Figura 1.4. Distribución litológica de los sedimentos superficiales (PEMEX, 1985).....	6
Figura 1.5 probabilidad estimada a lo largo de la zona de subducción mexicana (Nishenko and Singh, 1987).....	7
Figura 1.6 Placas tectónicas que originan la sismicidad en México (sing. and Ordaz, 1990).....	9
Figura 1.7 Regionalización sísmica de la Republica Mexicana (CFE, 1993).....	9
Figura 1.8 sismos con $M \geq 4.5$ desde 1964 a 1995 (SSN).....	12
Figura 1.9 sismos con $M \geq 6.5$ (SSN).....	12
Figura 1.10 Los sismos más importantes en el siglo XX (SSN).....	13
Figura 1.11 registros de epicentros de sismos de 1960 a 1999 (SMIS,2000).....	14
Figura 1.12 geología estructural de la Sonda de Campeche (Sclumberger, 1984).....	15

De la Orta, S., Siu, J., y Brindis, O. (1993). Espectros sísmicos del diseño para las instalaciones de plataformas, situadas en medio de alta sismicidad. Procedimientos del congreso nacional de X de la ingeniería sísmica, octubre 8-11, Puerto Vallarta, México.

Lefevre, L. V, and McNally, K. C. (1985). Stress distribution and Subduction of aseismic ridges in the Middle American Subduction zone. *J. Geophys. Res.* 90, 4495-4510.

Alcántara, L., Andrade, E., Espinosa, J. M., Flores, J. A., González, F., Javier, C., López, B., Macias, M. A., Medina, S., MENA, E., Murguía, L., Otero, J. A., Pérez, C., Quaas, R., Roldan, J. A., Sandoval, H., and Vázquez, R. (1997). Mexican Strong Motion Database, CD-ROM, Vol. 1. Mexican Society of Earthquake Engineering, edited by Universidad de Colima.

Rosenblueth, E., Ordaz, M., Sánchez-Sesma, F. J., and Singh, S. K. (1989). The Mexico Earthquake of September 19, 1985-Design Spectra for Mexico's Federal District. *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 1, pp. 273-291.

Schlumberger, (1984). Figure taken from Valdez, Y. P. (2002). Geostatistic analyses of the marine soil of La Sonda de Campeche, M. Sc. Thesis, Graduate School of Engineering, UNAM, July.

Capítulo II

Lista de figuras

- Fig 2.1 Plataformas marinas en la Sonda de Campeche, (Aarón Sánchez).....20
Fig 2.2 Número de plataformas existentes en la Sonda de Campeche. (PEMEX, 2001)..21

Lista de tablas

- Tabla 2.1 Cargas que soportara la cubierta inferior de la superestructura (PEMEX, 2001).....25
Tabla 2.2 Capacidad de carga de la cubierta principal (equipo de perforación)... (PEMEX, 2001).....26

Capítulo III

SSN [en línea]. (2002). “Acerca de Sismos”. In: Web del Servicio Sismológico Nacional de México, <http://www.ssn.unam.mx/index.html>.

Bolt, B. A. (1978). “Earthquakes, A Primer”. W. H. Freeman and Co, San Francisco, 241p.

Taboada, V. M. (1989). Degradación de la arcilla de la Ciudad de México por carga dinámica. Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Romo, M. P. (1990), “Comportamiento dinámico de la arcilla de la Ciudad de México y sus repercusiones en la ingeniería de cimentaciones”. Memoria del Simposio, “El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones a cinco años del sismo, septiembre, pp. 83-94.

Dobry, r. and Vucetic, M (1987), “State-of-the Art Paper: Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits,” Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering of Soils, México City, Vol. 2, pp. 51-87.

Lazan, B. J. (1968), “Camping of materials and members in structural mechanics, Pergamon Press Ltd. London.

Hardin, B. O; and Drenevich, V. P. (1972), Shear modulus and damping in Soil II, design equations and curves. Journal of the Soli Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, SM7, pp. 667-692.

Koutsoftas y Fisher, (1980), Dynamic properties of two marine clays, Journal of the Geotechnical Engineering Dicision, ASCE, Vol-106.

Anderson, D. G. and Stokoe, K. H; II(1978), “Shear Modulus: A Time-Dependent Soil Property”, Dynamic Geotechnical Testing.

Capítulo IV

Fig 4. 1. El complejo Ku-Maloob-Zaap se encuentra a 105 kilómetros al noroeste de Ciudad del Carmen (PEMEX, 1999)

PEMEX 1985.

Romo, M. P. (1990), “Comportamiento dinámico de la arcilla de la ciudad de México y su repercusión en la ingeniería de cimentaciones”. Memoria del Simposio El subsuelo de la Cuenca del valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones a cinco años del sismo, septiembre, pp.83-84.

Romo, M. P., and Ovando, S. (1996), “Modelling the dynamic behavior of Mexican clays. Proc. XII Int. Conf. On Earthq. Engn., Acapulco, México, CD edition.